

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ljerka Božičević Jurin**

Zagreb, 2013 godina.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Lulić, dipl. ing.

Student:

Ljerka Božičević Jurin

Zagreb, 2013 godina.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentorima prof.dr.sc.Ivanu Mahalcu i prof.dr.sc Zoranu Luliću na savjetima, vođenju i podršci. Zahvaljujem se i mojoj obitelji što su bili uz mene za vrijeme studiranja i izrade diplomskog rada

Ljerka Božičević Jurin



**SVEUČILIŠTE U ZAGREBU**  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
procesno-energetski, konstrukcijski, brodstrojarski i inženjersko modeliranje i računalne simulacije

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

## **DIPLOMSKI ZADATAK**

Student:

Mat. br.:

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

Opis zadatka:

Zadatak zadan:

Rok predaje rada:

Predviđeni datumi obrane:

Zadatak zadao:

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Zvonimir Guzović

## SADRŽAJ

Popis slika .....	7
Popis tabela.....	9
1 SAŽETAK .....	10
2 KINEMATIKA I SILE U KLIPNOM MEHANIZMU .....	12
2.1 Uvod .....	12
2.2 Kinematika klipnog mehanizma .....	13
2.2.1 Put klipa .....	13
2.2.2 Brzina klipa .....	14
2.2.3 Ubrzanje klipa .....	15
2.2.4 Sile u klipnom mehanizmu, moment i snaga motora.....	16
2.2.5 Sile i momenti u klipnom mehanizmu:.....	17
2.3 Uravnoteženje sila inercije.....	22
2.3.1 Metoda rotirajućih vektora.....	22
2.3.2 Analiza uravnoteženosti višecilindarskih motora.....	24
2.3.3 Uravnoteženje V-motora .....	25
2.4 Redoslijed i razmaci paljenja .....	28
3 ANALIZA URAVNOTEŽENOSTI KLIPNIH MOTORA.....	29
3.1 Redni motori .....	29
3.1.1 2-cilindarski redni motor .....	29
3.1.2 3-cilindarski redni motor .....	35
3.1.3 4-cilindarski redni motor – koljena u jednoj ravnini.....	38
3.1.4 4-cilindarski redni motor sa cross-plane koljenastim vratilom .....	41
3.1.5 5-cilindarski redni motor .....	44
3.1.6 6 cilindarski redni motor .....	47
Tabela 7      Usporedba rezultata za 6-cilindarski redni motor.....	49
3.2 V-motori.....	49
3.2.1 V-2 motor .....	49
3.2.2 V-4 motor .....	52
3.2.3 V6-60° split pin koljenasto vratilo .....	55
3.2.4 V-6 90° - koljenasto vratilo sa 3 koljena .....	58
3.2.5 V-8 motor – koljena u jednoj ravnini.....	61

3.2.6	V-8 motor 90° .....	63
3.2.7	V-12 motor 60° .....	66
4	ZAKLJUČAK.....	69
5	PRILOG.....	70
	Popis literature.....	71

## Popis slika

Slika 1	Koljenasto vratilo sa sklopom klipa i klipnjače automobilskog V8 motora i prikaz gibanja klipnog mehanizma	12
Slika 2	Shematski prikaz klipnog mehanizma	13
Slika 3	Put klipa (crveno), plavo: $r(1 - \cos\alpha)$ , zeleno: $r1 - \cos2\alpha$	14
Slika 4	Brzina klipa sa prvim i drugim harmonikom	15
Slika 5	. Norton 500 Manx (1961.) sa srednjom brzinom klipa oko 22m/s i Ferrari F1 (2009) sa srednjom brzinom klipa oko 26m/s	15
Slika 6	Ubrzanje klipa	16
Slika 7	Sile u klipnom mehanizmu	16
Slika 8	Sila na klip i indicirani moment jednocilindarskog četverotaktnog Ottovog motora	19
Slika 9	Utjecaj brzine vrtnje	20
Slika 10	Utjecaj broja cilindara na krivulju zakretnog mometna motora	21
Slika 11	Sile inercije i-tog reda prikazane pomoću dva rotirajuća vektora	23
Slika 12.	Prikaz protuutega na koljenastom vratilu	23
Slika 13	Uravnoteženost 4-taktnog, 4-cilindarskog rednog motora	24
Slika 14	Prikaz postavljanja 3 koordinatna sustava za analizu V-motora	25
Slika 15	Globalni koordinatni sustav i kinematička shema V-motora.	26
Slika 16	Honda V-2 motor s kutom između cilindara i pomaknutim rukavcima za potpuno uravnoteženje sila inercije 1.reda.	28
Slika 17	S lijeva na desno: NSU Prinz, ugrađeni 2-cilindarski motor u Fiat 500, Honda Silver Wing	29
Slika 18	Raspored polovičnih vektora sile inercije dobivenih za 1.,2.,4. 6.red sila inercije	30
Slika 19	Dijagram sila inercije 1.reda	31
Slika 20	Moment sila inercije 1 reda,uravnoteženo	31
Slika 21	Raspored polovičnih vektora sila inercije dobivenih za 1.,2.,4.,6. red	34
Slika 22	Dijagrami sila i momenata inercije	34
Slika 23	Audi A2 i motor Suzuki F5A	35
Slika 24	Raspored polovičnih vektora sile inercije za 1.,2.,4.,6 red	36
Slika 25	Dijagrami sila i momenta inercije 1.reda	37
Slika 26	Porsche 944 iz 4-cilindarskog motora dobio je volumen od 3.0L, desno je presjek Renault-Nissanovog motora	38
Slika 27	Raspored polovičnih vektora sila inercije za 1.,2.,4.,6.red	40
Slika 28	Dijagram sila i momenta inercije 1.reda	40
Slika 29	Yamaha R1 2013, primjer cross – plane koljenastog vratila	41
Slika 30	Raspored polovičnih vektora sile inercije po redovima	42
Slika 31	Dijagrami sila i momenata inercije	43
Slika 32	Primjer 5-cilindarskog motora ugrađenog u Volvo	44
Slika 33	Raspored polovičnih vektora sila inercije po redovima	45
Slika 34	Dijagrami sila i momenta inercije prvog reda	46

Slika 35	BMW-ov redni 6 cilindarski motor	47
Slika 36	Raspored rotirajućih vektora sila inercije po redovima	48
Slika 37	Primjeri ugradnje V-2 motora u Harley Davidson i Moto Guzzi	49
Slika 38	Rotirajući vektori sila inercije po redovima	50
Slika 39	Dijagrami sila i momenta inercije 1.reda	51
Slika 40	Primjer Forda Taunusa	52
Slika 41	Rotirajući vektori sila inercije po redovima sila inercije	53
Slika 42	Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda	54
Slika 43	GM V-6 60°	55
Slika 44	Rotirajući vektori sila inercije po redovima	56
Slika 45	Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda	57
Slika 46	V-6 GM Buick	58
Slika 47	Rotirajući vektori sila inercije od 1.do 6.reda	59
Slika 48	Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda	60
Slika 49	Rotirajući vektori sila inercije	62
Slika 50	Primjer cross-plane koljenastog vratila V-8 motora	63
Slika 51	Rotirajući vektori sila inercije po redovima	64
Slika 52	Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda	65
Slika 53	Rotirajući vektori sila inercije	67



## Popis tabela

Tabela 1°	Usporedba rezultata za 2-cilindarski redni motor – 360° .....	32
Tabela 2	Usporedba rezultata za 2-cilindarski redni motor -180° .....	35
Tabela 3	Usporedba rezultata za 3-cilindarski redni motor .....	38
Tabela 4	Usporedba rezultata za 4-cilindarski redni motor – koljena u jednoj ravnini	41
Tabela 5	Usporedba rezultata za cross-plane .....	44
Tabela 6	Usporedba rezultata za 5-cilindarski redni motor .....	47
Tabela 7	Usporedba rezultata za 6-cilindarski redni motor .....	49
Tabela 8	Usporedba rezultata za V-2 motor .....	52
Tabela 9	Usporedba rezultata za V4-60° motor .....	55
Tabela 10	Usporedba rezultata za V-6 60° .....	58
Tabela 11	Usporedba rezultata za V-60 90° .....	61
Tabela 12	Usporedba rezultata.....	63
Tabela 13	Usporedba rezultata.....	66
Tabela 14	Usporedba rezultata.....	68

## 1 SAŽETAK

Ključne riječi: uravnoteženje klipnih motora, sile inercije, redni motori, V-motori

Ovim radom obuhvaćen je klipni mehanizam motora, sile koje nastaju te je posebna pažnja posvećena silama inercije koje je za miran rad motora potrebno uravnotežiti.

Uravnoteženje analiziranih motora provedeno je na dva različita načina, grafičkom metodom rotirajućih vektora te analitičkim putem rješavanom u matematičkom programu Mathcad. Dobiveni rezultati uobličeni su u pregledne tablice koje ih uspoređuju sa rezultatima literature.

Nakon analize sila inercija napravljen je povijesni pregled načina uravnoteženja motora.

## SUMMARY

Key words: balancing of masses in the reciprocating engine, forces of inertia, , inline engines, V-engines

This paper is dealing with problems regarding balancing masses in reciprocating engines. Analysis of balancing masses is solved in two ways, first method is graphic and the second is analytic. The results are presented in tables and compared with literature, all given result are matched with literature.

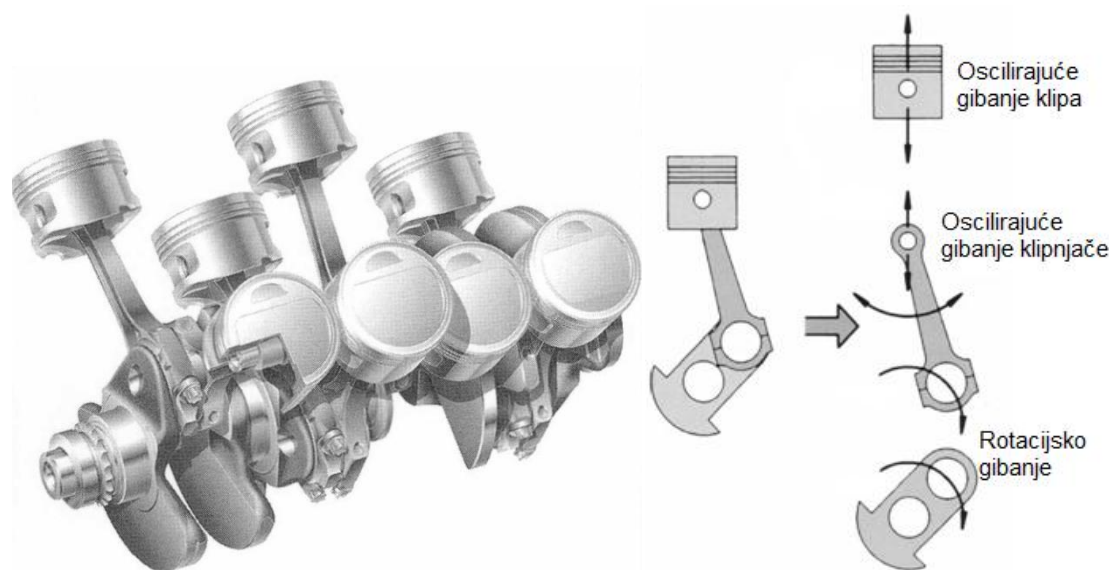
## 2 KINEMATIKA I SILE U KLIPNOM MECHANIZMU

### 2.1 Uvod

Klipni mehanizam je mehanizam koji ne pretvara samo pravocrtno, oscilirajuće gibanje u rotacijsko, nego termodinamičkim procesima dobiva snagu, rad, iskoristivost. Međutim uz prednosti postoje i nedostaci sa kojima se mehanizam mora suočiti, a neka od njih su:

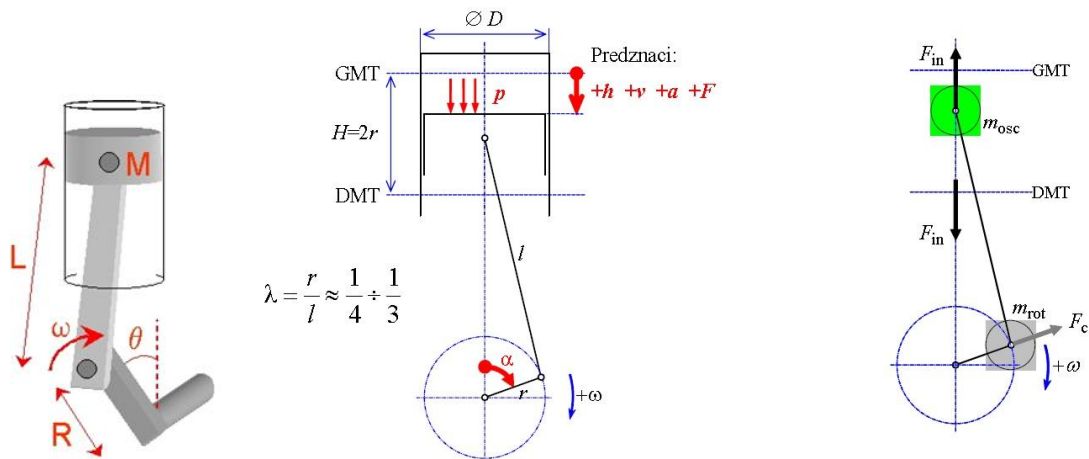
- Ograničenje brzine i snage zbog sila inercije
- Nejednolika sila transmisije koja zahtjeva posebne mjere glede oblika više cilindara, redoslijeda paljenja, uravnoteženja sila inercije i zamašnjaka
- Amplitude rotirajućih i oscilirajućih sila predstavljaju izrazito naprezanje u koljenastom vratilu i pogonskom sustavu
- Problemi geometrije uslijed sila i vršnih naprezanja
- Podmazivanje

Pogonski sustav koljenastog vratila kod automobilskih motora obuhvaća klip sa klipnim prstenima, osovinicu klipa, klipnjaču, koljenasto vratilo sa protutezima i ležajima.



**Slika 1** Koljenasto vratilo sa sklopom klipa i klipnjače automobilskog V8 motora i prikaz gibanja klipnog mehanizma

## 2.2 Kinematika klipnog mehanizma



**Slika 2** Shematski prikaz klipnog mehanizma

### 2.2.1 Put klipa

Pomak klipa  $h$ , jednostavno se određuje postavljanjem jednadžbi prema slici 2.

$$h = r + l - (r \cos \alpha + l \cos \beta) = \dots = r \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{1}{r} (1 - \sqrt{1 - \sin^2 \beta}) \right] \quad (1.1)$$

Uvođenjem omjera klipnjače  $\lambda$ , te izračunavanjem trokuta (O,A,B) slijedi:

$$\sin \beta = \frac{r}{l} \sin \alpha = \lambda \sin \alpha \quad (1.2)$$

Uvrštavanjem jednakosti (1.2) u izraz (1.1) dobiva se slijedeći izraz:

$$h = r \left[ (1 - \cos \alpha) + \frac{1}{\lambda} (1 - \sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}) \right] \quad (1.3)$$

Razvojem korijena  $\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha} = \sqrt{1 - z} = f(z)$  u MacLaurinov red, vrijedi u okolici nule, no svaki novi položaj mehanizma može se proglašiti početnim tj. nultim.

Uređivanjem članova uz pomoć transformacijskih izraza za trigonometrijske funkcije, dobiva se oblik:

$$h = r \left( A_0 - A_1 \cos \alpha - \frac{A_2}{4} \cos 2\alpha - \frac{A_4}{16} \cos 4\alpha - \frac{A_6}{36} \cos 6\alpha - \dots \right) \quad (1.4)$$

Faktori  $A_0, A_1, A_2$  koriste se u analizi uravnoteženosti sila inercije te su određeni slijedećim izrazima:

$$A_0 = 1 + \frac{1}{4} \lambda + \frac{3}{64} \lambda^3 + \frac{5}{256} \lambda^5 + \dots \quad \sim 1 + \frac{\lambda}{4}$$

$$A_1 = 1$$

$$A_2 = \lambda + \frac{1}{4} \lambda^3 + \frac{15}{128} \lambda^5 + \dots \quad \sim \lambda$$

$$A_4 = -\frac{1}{4}\lambda^3 - \frac{3}{16}\lambda^5 - \dots \quad \sim -\frac{\lambda^3}{4} \quad (1.5)$$

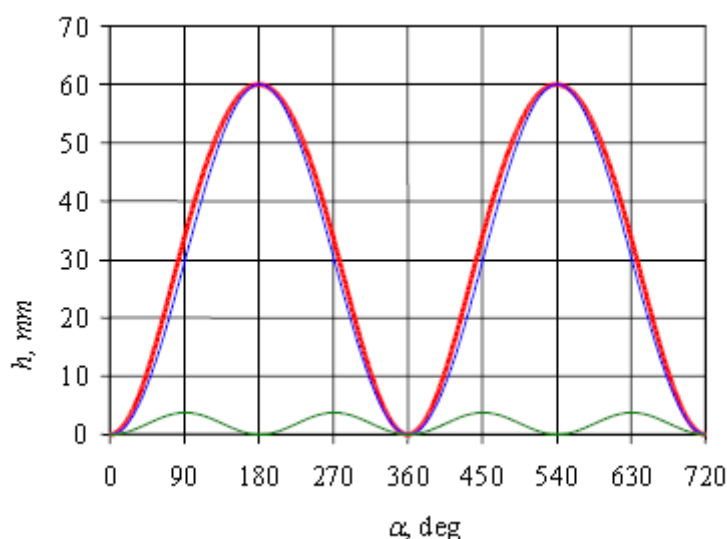
$$A_6 = \frac{9}{128}\lambda^5 + \dots \quad \sim \frac{\lambda^5}{14}$$

$$A_8 = -\frac{1}{39}\lambda^7 - \dots \quad \sim -\frac{\lambda^7}{39}$$

Uzimajući u obzir samo prva dva harmonika, dobiva se približni izraz za pomak klipa od GMT.

$$h \approx r \left[ 1 - \cos\alpha + \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\alpha) \right]$$

$$x_{max} = x_{90^\circ} \approx r \frac{\lambda}{4}(1 - \cos 2\alpha) = r \frac{\lambda}{2} = \frac{r^2}{2l} \quad (1.6)$$



**Slika 3** Put klipa (crveno), plavo:  $r(1 - \cos\alpha)$ , zeleno:  $r(1 - \cos 2\alpha)$

### 2.2.2 Brzina klipa

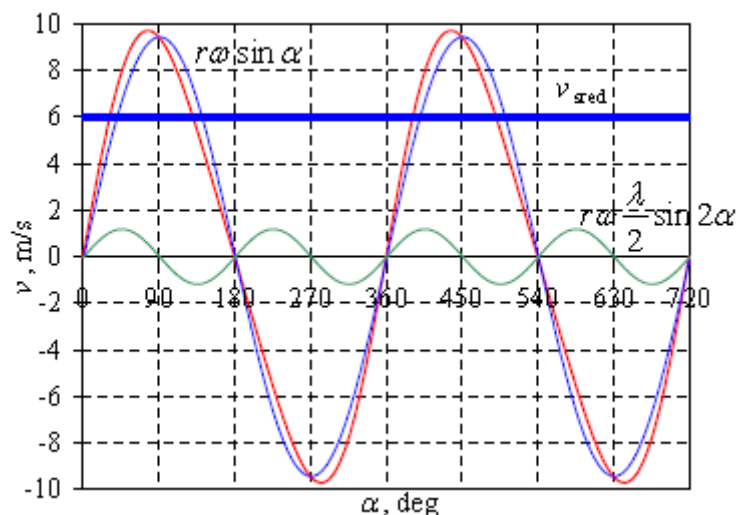
Brzina klipa jednaka je derivaciji puta po vremenu:

$$v \approx r\omega \left( \sin\alpha + \frac{\lambda}{2}\sin 2\alpha \right)$$

$$v = r\omega \left( \sin\alpha + \lambda \frac{\sin 2\alpha}{2\sqrt{1-\lambda^2\sin^2\alpha}} \right) \quad (1.6)$$

Srednja brzina klipa je važan pokazatelj sklopa klip/karika/cilindar, a izračunava se prema izrazu:

$$v_{sred} = 2Hn \quad (1.7)$$



**Slika 4** Brzina klipa sa prvim i drugim harmonikom

Što se tiče srednje brzine klipa, ona se malo promijenila od pedesetih godina prošlog stoljeća pa do danas. Pedesetih godina iznosila je 22 m/s, a kod današnjih motora Formule-1 je oko 25 m/s. Prekoračenje ovih granica dovodi do povećanog trošenja klipnih karika i cilindara. Srednja brzina klipa manja je kod kratkohodnih motora ( $H/D < 1$ ), oni se u pravilu vrte brže, zbog većeg promjera klipa veća je i masa, pa su uslijed toga veće i sile inercije oscilirajućih masa. Današnji motori automobila su dugohodni ( $H/D > 1$ ), srednja brzina klipa je veća od 22 m/s, a trajnost im je povećana novim i poboljšanim materijalima klipa, karike i cilindra.



**Slika 5** . Norton 500 Manx (1961.) sa srednjom brzinom klipa oko 22m/s i Ferrari F1 (2009) sa srednjom brzinom klipa oko 26m/s

### 2.2.3 Ubrzanje klipa

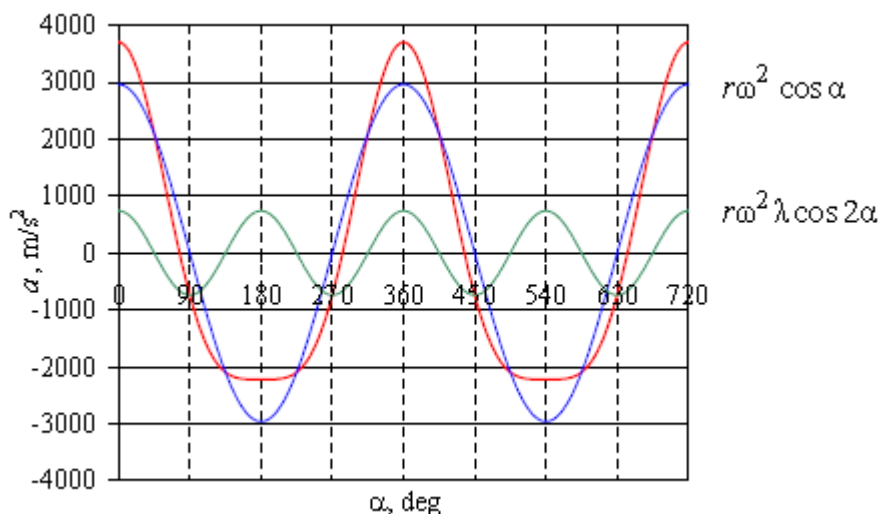
Ubrzanje klipa je jednako derivaciji njegove brzine po vremenu.

$$a \approx r\omega^2(\cos\alpha + \lambda\cos 2\alpha) \quad (1.8)$$

Rastavljanje ubrzanja na harmonike posebno je važno kod izračunavanja inercijskih sila u klipnom mehanizmu uslijed masa u pravocrtnom gibanju.

U GMT i DMT kut zakreta koljenastog vratila je  $a = k\pi$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$

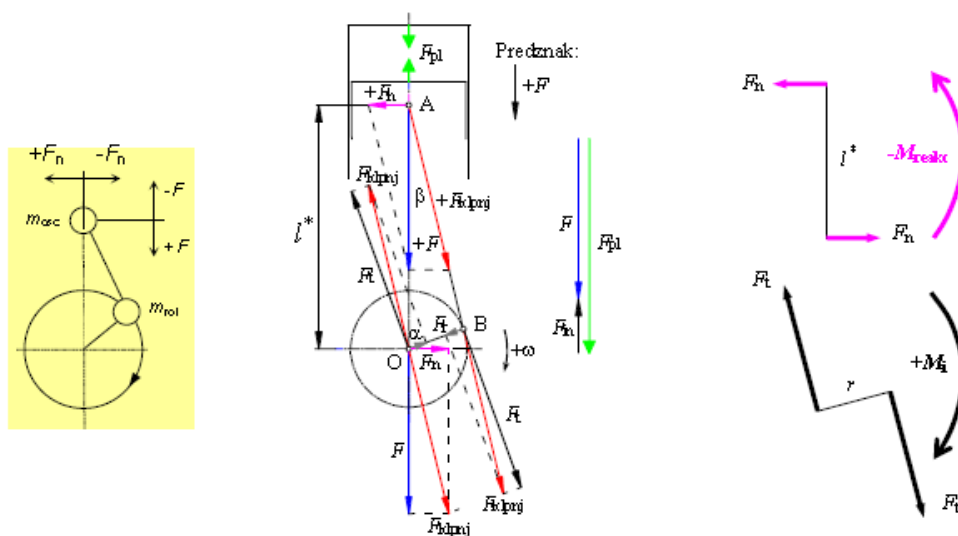
$$\frac{a_{GMT}}{a_{DMT}} \approx \frac{r\omega^2(1+\lambda)}{\omega^2(-1+\lambda)} = -\frac{(1+\lambda)}{(-1+\lambda)} \quad (1.9)$$



**Slika 6** Ubrzanje klipa

### 2.2.4 Sile u klipnom mehanizmu, moment i snaga motora

Sile u klipnom mehanizmu su sile izazvane pritiskom plinova na klip te inercije oscilirajućih i rotirajućih masa.



**Slika 7** Sile u klipnom mehanizmu

U osi rotacije O dodana je i oduzeta sila u klipnjači  $F_{klpnj}$ , na taj način očuvana je ravnoteža sila. Tangencijalna sila  $F_t$  okreće koljenasto vratilo, a radijalna sila  $F_r$  opterećuje glavne ležajeve koljenastog vratila. Oslonci motora preuzimaju zakretni moment na koljenastom vratilu i moment reakcije kućišta.

Predznaci sila definirani su na način da pozitivan smjer sile na klip  $F$  podudara se sa smjerom djelovanja pritiska plinova u taktu ekspanzije. S gornje strane na klip djeluje tlak plinova u cilindru  $p_{cil}(\alpha)$ , a s donje strane tlak u kućištu koljenastog vratila  $p_{kuc}$ .



Oscilirajuća masa  $m_{osc}$  sastoji se od mase klipa  $m_k$ , klipnih prstena (karika)  $m_{kp}$ , osovinnice  $m_{osov}$ , osigurača osovinnice  $m_{osig}$ , te dijela klipnjače koji se giba pravocrtno  $m_{klpnj,osc}$ . Rotirajuća masa  $m_{rot}$  sadrži masu letećeg rukavca  $m_{ruk}$ , masu ramena koljenastog vratila te masu dijela klipnjače koji rotira  $m_{klpnj,rot}$ .

Sila plinova  $F_{pl}$  uravnotežena je unutar cilindra, tlak plinova djeluje jednako na sve strane, a reakcije koje pritom stvara na stijenkama cilindra uravnotežene su u kućištu motora. Moment uslijed sile plinova uravnotežen je otporima u motoru i vanjskim opterećenjem na koljenastom vratilu. Nejednolikost sile plinova ima za posljedicu nejednolikost zakretnog momenta koji pojačava vibracije u osloncima i uzrokom je torzijskih vibracija i uslijed toga zamornih lomova koljenastog vratila.

Sila inercije  $F_{in}$  oscilirajućih masa ostaje neuravnotežena te izaziva vibracije koje motor kao cjelina prenosi na oslonce.

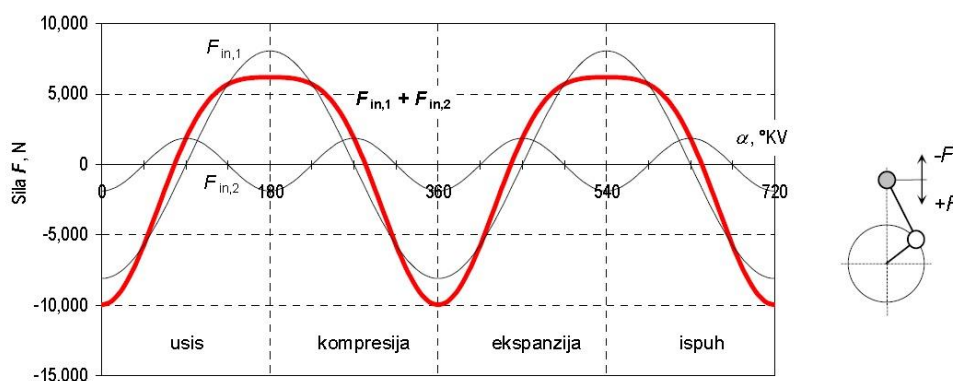
## 2.2.5 Sile i momenti u klipnom mehanizmu:

### a) Sile inercije oscilirajućih masa

$$1. \text{reda: } F_{in,1} = -m_{osc} r \omega^2 A_1 = -m_{osc} r \omega^2 \cos \alpha \quad (1.9)$$

$$2. \text{reda: } F_{in,2} = -m_{osc} r \omega^2 A_2 = -m_{osc} r \omega^2 \lambda \cos 2\alpha \quad (1.10)$$

$$1.+2. \text{reda: } F_{in} = F_{in,1} + F_{in,2} \quad (1.11)$$



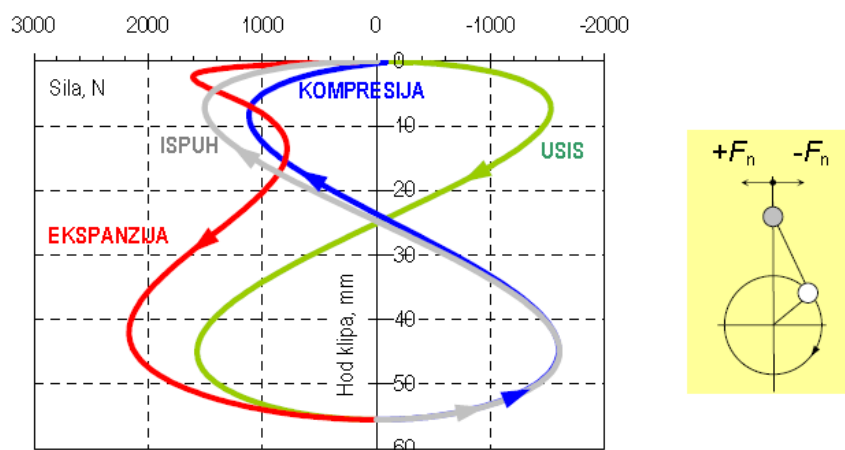
Slika.7 Sile inercije oscilirajućih masa

### b) Rezultirajuća sila na klip sastoji se od sile plinova $F_{pl}$ i sile inercije oscilirajućih masa $F_{in}$ :

$$F = F_{pl} + F_{in} = [p_{cil}(\alpha) - p_{kuć}]A + F_{in} \quad (1.12)$$

$$c) \text{ Sila na klipnjaču: } F_{klpnj} = \frac{F}{\sqrt{1-\lambda^2 \sin^2 \alpha}} \quad (1.13)$$

$$d) \text{ Normalna sila na bok cilindra: } F_n = F_{klpnj} \lambda \sin \alpha \quad (1.14)$$



Slika 8. Normalna sila na bok cilindra

- e) Tangencijalna sila pozitivnog je predznaka ako potpomaže okretanje koljenastog vratila. Ukupan rad dijela tangencijalne sile koji je posljedica sile inercije oscilirajućih masa u jednom je periodu tangencijalne sile jednak nuli ako zanemarimo silu trenja. Period tangencijalne sile kod višecilindarskih motora jednak je međusobnom razmaku paljenja cilindara.

Komponenta uslijed pritiska plinova:

$$F_{t,pl} = [p_{cil}(\alpha) - p_{kuć}]A \sin \alpha \left( 1 + \frac{\lambda \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) \quad (1.15)$$

Komponenta uslijed sile inercije oscilirajućih masa:

$$F_{t,in} = F_{in} \sin \alpha \left( 1 + \frac{\lambda \cos \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) \quad (1.16)$$

Rezultirajuća tangencijalna sila :

$$F_t = F_{t,pl} + F_{t,in} \quad (1.17)$$

- f) Radijalna sila pozitivnog je predznaka kada djeluje od rukavca klipnjače prema osi rotacije koljenastog vratila.

Komponenta uslijed pritiska plinova:

$$F_{r,pl} = [p_{cil}(\alpha) - p_{kuć}]A \left( \cos \alpha - \frac{\lambda \sin \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) \quad (1.18)$$

Komponenta uslijed oscilirajućih masa:

$$F_{r,in} = F_{in} \left( \cos \alpha - \frac{\lambda \sin \alpha}{\sqrt{1 - \lambda^2 \sin^2 \alpha}} \right) \quad (1.19)$$

Komponenta uslijed centrifugalne sile rotirajućeg dijela klipnjače:

$$F_{r,klpnj} = -m_{klpnj,rot}r\omega^2 \quad (1.20)$$

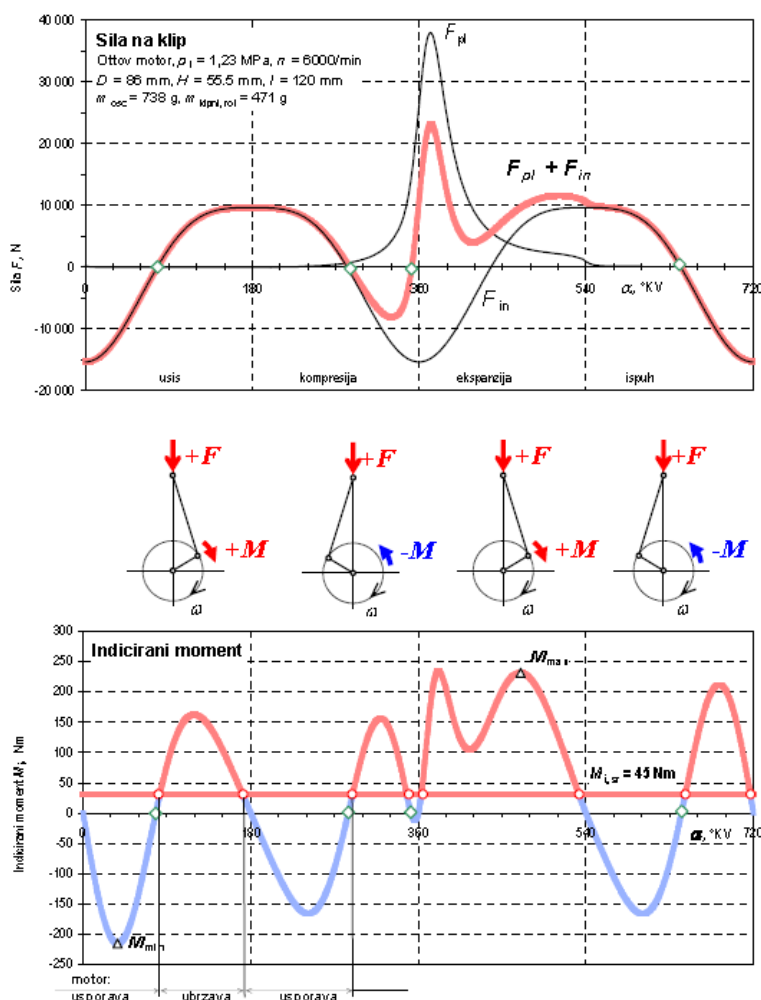
Rezultirajuća radijalna sila:

$$F_r = F_{r,pl} + F_{r,in} + F_{r,klpnj}$$

g) Indicirani moment motora:

$$M_i = F_t r \quad (1.21)$$

Period indiciranog momenta višecilindarskih motora identičan je periodu tangencijalne sile.



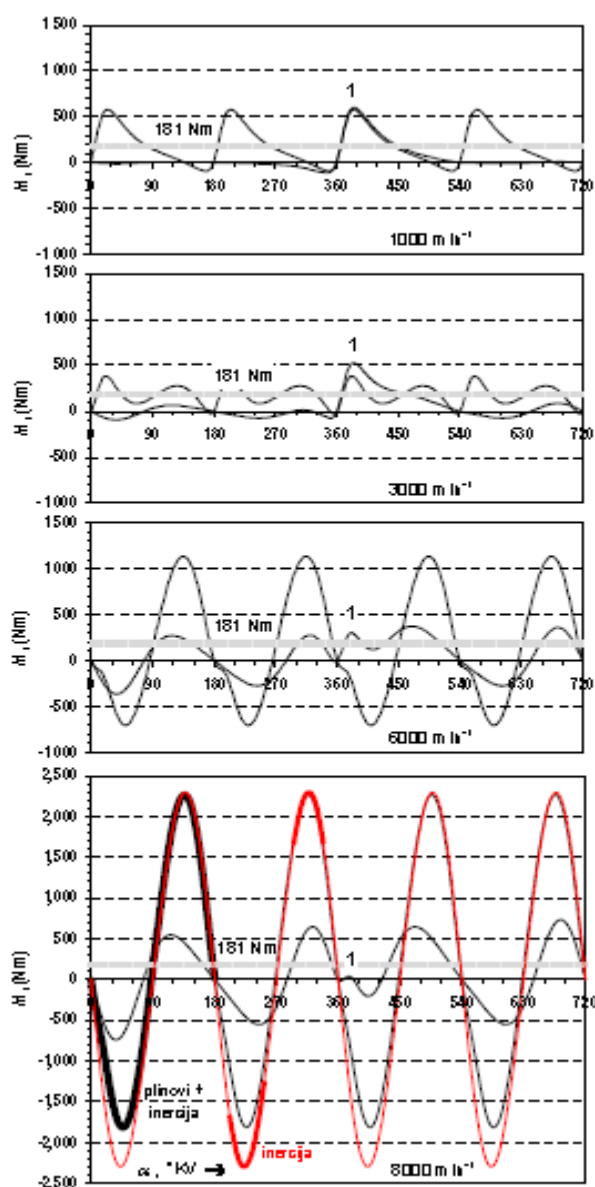
**Slika 8** Sila na klip i indicirani moment jednocilindarskog četverotaktnog Ottovog motora

Promotri li se slika 8. uočava se da u taktu usisa pozitivna sila  $F$  daje pozitivan moment  $M$ , u taktu kompresije pozitivna sila  $F$  daje negativni moment  $M$ .

Moment poprima vrijednost nula u dva slučaja:

1. rezultirajuća sila na klip je jednaka nuli ( $F_{pl} + F_{in} = 0$ )
2. u GMT i DMT, tj. kad je kut zakreta koljenastog vratila jednak  $0, \pi, 2\pi, 3\pi..$

Tok grafova jako ovisi o brzini vrtnje motora. Kod brzohodnih (Ottovi motori) veći je utjecaj sile inercije  $F_{in}$ , a kod sporohodnih (Dieselovi motori) sila plinova  $F_{pl}$ . Izrazita neujednačenost zakretnog momenta dovodi u radu motora do torzijskih vibracija koljenastog vratila, pa je to jedan od glavnih kriterija za proračun koljenastog vratila.



$$k = \frac{M_{max} - M_{min}}{\bar{M}}$$

$$1000 \text{ min}^{-1} \quad k = 3,7$$

$$3000 \text{ min}^{-1} \quad k = 2,2$$

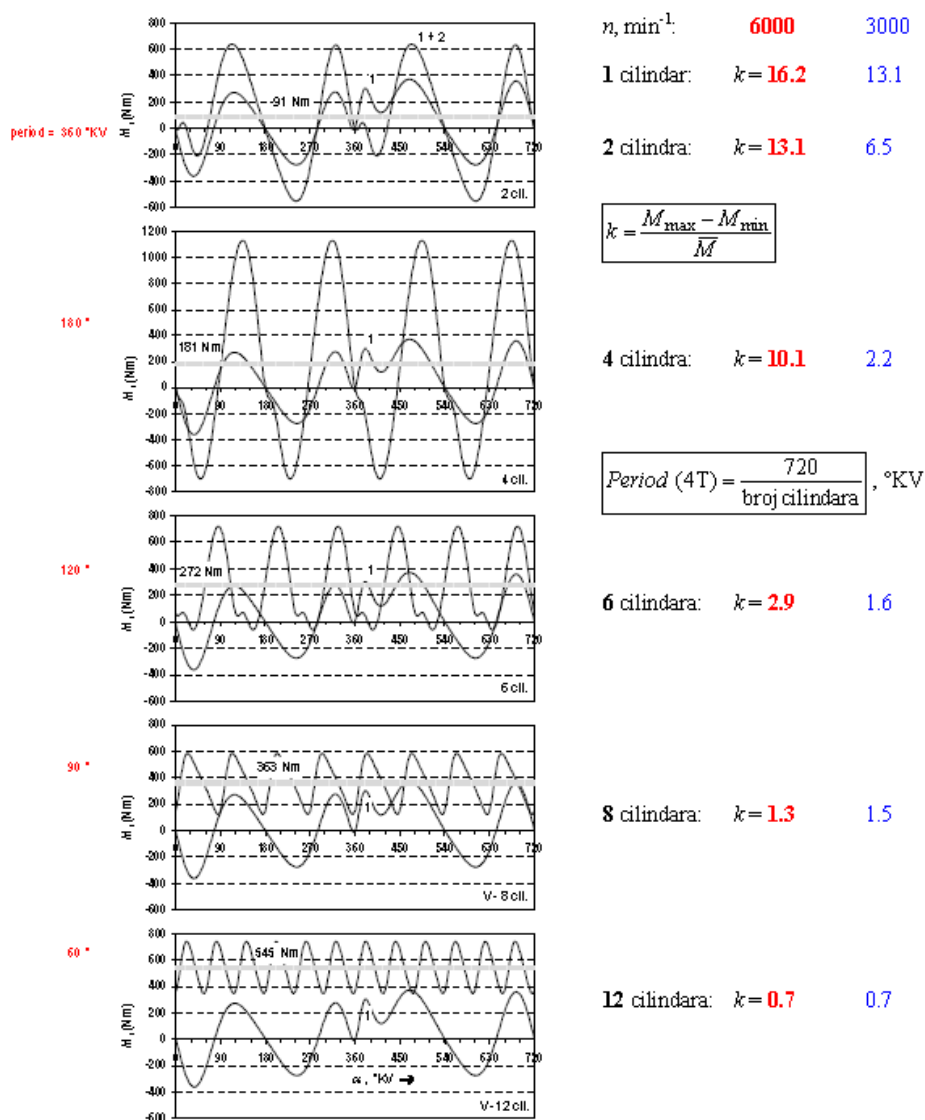
$$6000 \text{ min}^{-1} \quad k = 10,1$$

$$8000 \text{ min}^{-1} \quad k = 20,0$$

**Slika 9** Utjecaj brzine vrtnje

Rezultirajući moment sastoji se najvećim dijelom od momenta sile pritiska plinova na klip u taktu ekspanzije.

Moment uslijed samih sila inercije ima negativne amplitude čak i veće nego rezultirajući moment. Kod brzine vrtnje od  $8000 \text{ min}^{-1}$  klipni mehanizam nešto je jače opterećen ako se motor vrti bez tereta. Srednji indicirani tlak  $p_i = 1,23 \text{ MPa}$  isti je kod svih brzina vrtnje, kod brzine vrtnje od  $1000 \text{ min}^{-1}$  prevladavaju sile plinova, dok se kod  $3000 \text{ min}^{-1}$  sile inercije i plinova međusobno najviše poništavaju i motor se najmirnije vrti. Kod velikih brzina vrtnje utjecaj sile plinova se gotovo posve izgubio te prevladavaju sile inercije koje rastu s kvadratom brzine.



**Slika 10** Utjecaj broja cilindara na krivulju zakretnog momenta motora

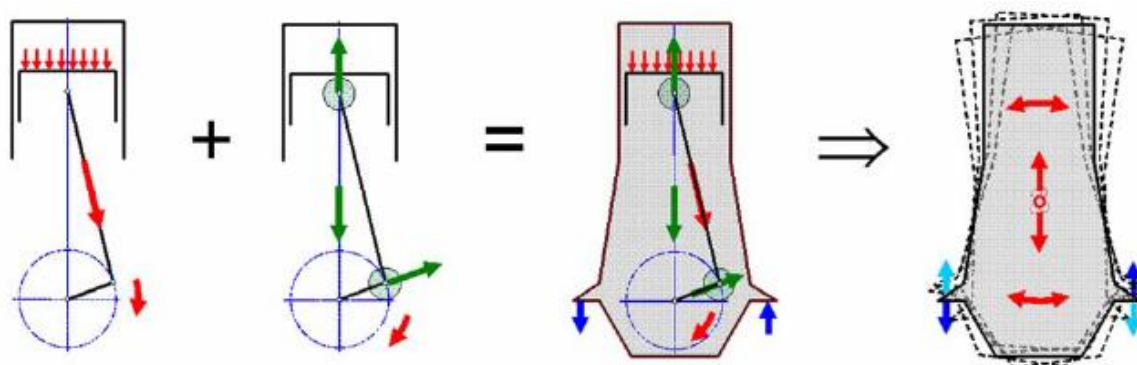
Indicirani moment četvertotaktnog Ottovog motora s jednakim razmacima paljenja, s 2, 4, 6, 8, 12 cilindara, srednjeg indiciranog tlaka  $p_i = 1,23 \text{ MPa}$  i brzine vrtnje  $n = 6000 \text{ min}^{-1}$ , indicirane su snage  $29 \text{ kW/cil.}$  Kod manje brzine vrtnje sile inercije su manje, ne samo amplitude nego i vršne vrijednosti krivulje momenta su također manje, pa je stupanj neujednačenosti momenta  $k$  manji.

## 2.3 Uravnoteženje sila inercije

Sile u klipnom mehanizmu izazvane su pritiskom plinova na klip te tromošću, inercijom oscilirajućih i rotirajućih masa. Nejednolika sila plinova u cilindru ima za posljedicu nejednoliki moment motora. S povećanjem broja cilindara smanjuje se neujednačenost rezultirajućeg zakretnog momenta, a postiže se bolja međusobna uravnoteženost inercijskih sila oscilirajućih masa klipnoga mehanizma.

Sile plinova i inercije u klipnom mehanizmu okreću koljenasto vratilo ali i opterećuju dijelove motora i stvaraju reakcije u njegovim osloncima. Uravnotežavanjem inercijske sile ne nestaju nego se samo poništava njihovo djelovanje prema van, tj. motor se u osloncima manje tresce. Sile inercije mogu uravnotežiti dodavanjem protusila i to :

- Protutezima na koljenastom vratilu
  - Centrifugalne sile
  - 50% sila inercija 1.reda
- Parom osovina s utezima
  - Sile inercije 2.reda

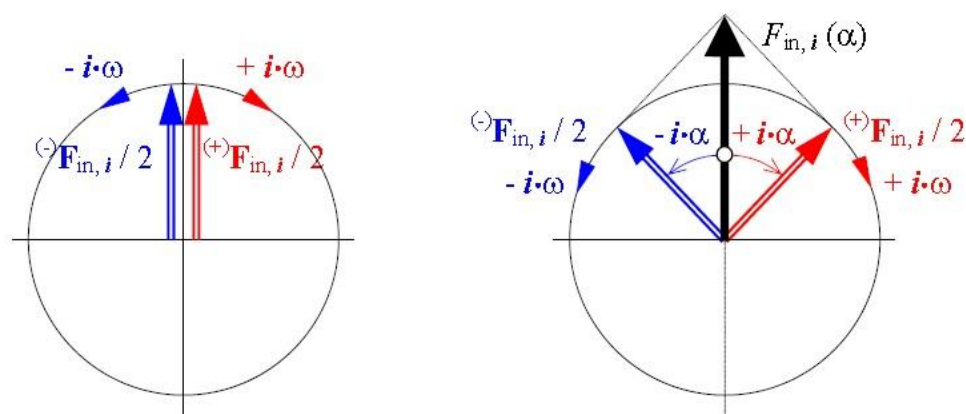


Slika 7. Sile plinova i inercije te djelovanje na oslonce motora

### 2.3.1 Metoda rotirajućih vektora

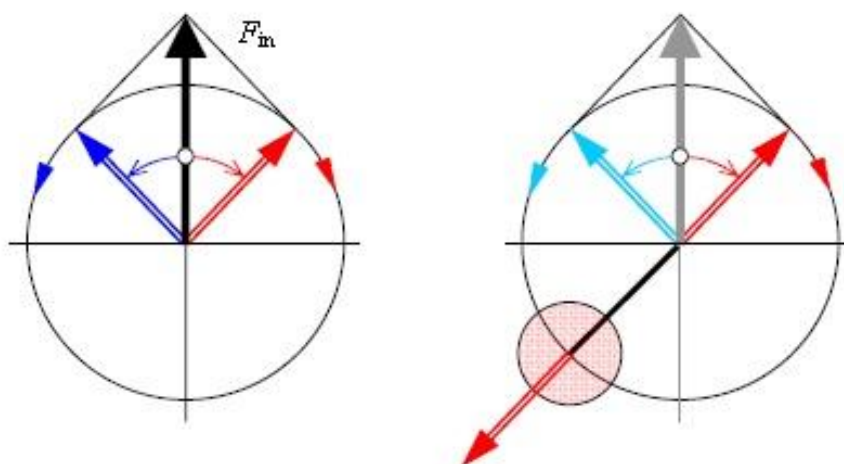
Oscilirajuća masa giba se po uzdužnoj osi cilindra, te će i njena sila inercije djelovati isključivo po uzdužnoj osi mijenjajući pritom smjer i veličinu. Analiza ovih sila jednostavna je ako se sila inercije prikaže pomoću dva vektora polovičnih amplituda koji rotiraju u suprotnim smjerovima.

Okrene li se koljenasto vratilo za kut  $\alpha$ , vektori će se okrenuti svaki na svoju stranu za  $(\pm\alpha)$ , a njihova će suma u tom trenutku biti jednaka sili inercije  $F_{in,i}$ .



**Slika 11** Sile inercije i-tog reda prikazane pomoću dva rotirajuća vektora

Kako bi se analizirala međusobna uravnoteženost pojedinih cilindara motora dovoljno je promotriti sile inercije u nekom karakterističnom položaju koljenastog vratila, kad je referentni 1.cilindar u GMT, tada zvijezda koljena ujedno prikazuje zvijezdu vektora sila inercije prvoga reda.



**Slika 12.** Prikaz protutezaka na koljenastom vratilu

Motor može biti neuravnotežen u pogledu sila inercije oscilirajućih masa i njihovih momenata oko težišta, pretpostavlja se da je težište motora na sredini uzdužne osi koljenastog vratila.

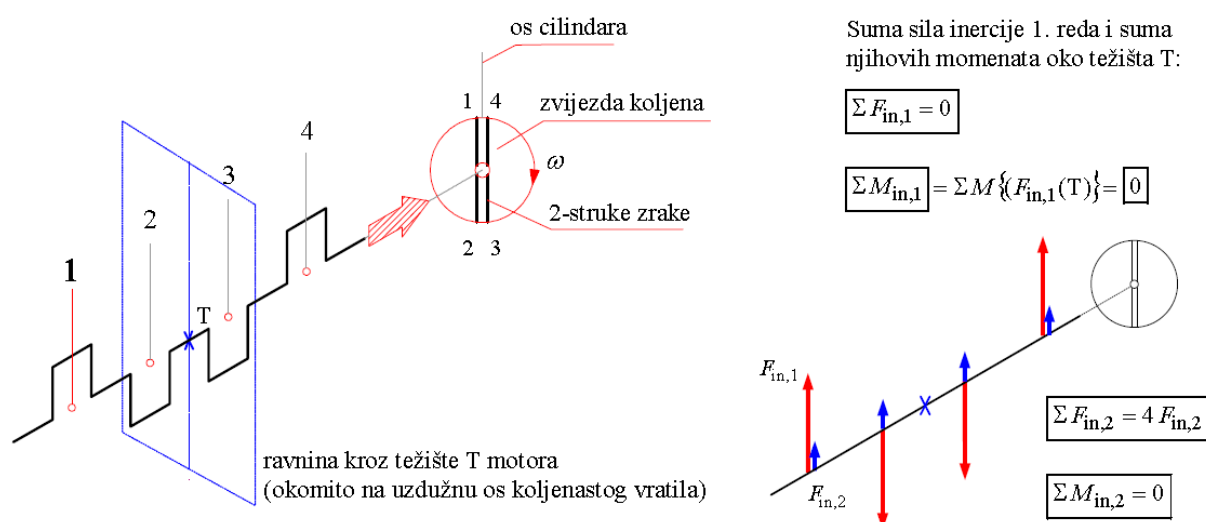
Protutezima na koljenastom vratilu može se uravnotežiti samo onaj vektor koji se okreće u istom smjeru ( $+\omega$ ) kao i koljenasto vratilo, znači može se uravnotežiti 50% sile inercije prvoga reda. Za uravnoteženje drugog vektora, u motor treba ugraditi osovinu s utezima koja se okreće jednako brzo kao i koljenasto vratilo ali u suprotnom smjeru ( $-\omega$ ). Ako bi se na koljenasto vratilo stavili dovoljno veliki utezi da se uravnoteži cijela sila inercije prvoga reda, rezultirajuća sila bi u GMT i DMT bila jednaka nuli, ali bi zato kod  $\alpha = 90^\circ$  ostala neuravnotežena inercijska sila jednaka punom iznosu amplitude  $F_{in,1}$ , tada bi motor vibrirao poprečno, u ravnini okomitoj na uzdužnu os cilindra.

### 2.3.2 Analiza uravnoteženosti višecilindarskih motora

Kod analize uravnoteženosti sila inercije višecilindarskih motora kao cjeline, obzirom na rezultirajuće sile i momente koji se prenose na oslonce motora, dovoljno je promotriti međusobnu uravnoteženost u jednom ili više pogodno odabranih položaja klipnog mehanizma.

Za analizu vrijede pravila:

- Zvijezda koljena je ujedno i zvijezda sila 1.rede
- Položaji vektora sila inercije u zvijezdi višega reda dobiju se tako da se za svaki pojedini cilindar kut sile 1.rede u odnosu na referentni cilindar pomnoži s brojem reda.
- Ako je zvijezda sila 1.rede centralno simetrična, motor je uravnotežen u pogledu sila inercije 1.rede
- Ako je još k tome i koljenasto vratilo uzdužno simetrično, motor je uravnotežen u pogledu momenata sila inercije 1.rede
- Ako kod 4-taktnih motora s parnim brojem koljena zvijezde koljena ima dvostruke zrake, motor ima jednake razmake paljenja



**Slika 13** Uravnoteženost 4-taktnog, 4-cilindarskog rednog motora

Kod višecilindarskih motora svaki cilindar ima svoje koljeno koljenastog vratila i bilo bi nespretno pratiti kutove zakreta svih koljena, zbog toga prvi cilindar proglašavamo referentim i prati se kut zakreta njegovog koljena, a svi kutovi zakreta ostalih koljena izražavaju se pomoću kuta zakreta prvog cilindra kome se za svaki drugi cilindar dodaje odgovarajući fazni pomak.

Kod analize sila inercija i njihovih momenata može se postupiti na dva načina:

- Mogu se napisati jednačbe sila inercije i njihovih momenata za svaki pojedini cilindar te zbrojiti njihove vrijednosti uz uzimanje u obzir odgovarajućih faznih



pomaka za referentim cilindrom i prikazati njihove vrijednosti dijagramom u periodu kuta zakreta koljenastog vratila od  $360^\circ$ .

- Drugi način je da se shematski skicira koljenasto vratilo te se nacrtaju vektori sila inercije pojedinih cilindara u promatranom položaju, primjenjujući prikaz sile inercije u pojedinom cilindru pomoću rotirajućih vektora polovičnih amplituda. Dovoljno je pritom promotriti koljenasto vratilo u nekoliko karakterističnih položaja i mogu se donijeti zaključci o uravnoteženosti motora u pogledu sila inercije i njihovih momenata oko težišta motora.

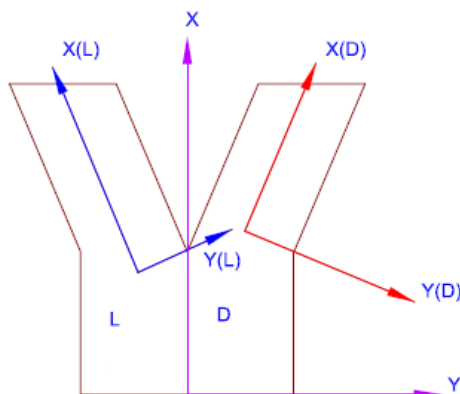
No, kada se promatra cilindar čije koljeno nije u GMT, treba imati na umu da je početni položaj klipa i u tom cilindru u GMT, to je koljeno došlo u trenutni položaj rotacijom iz GMT, a rotirajući vektori prvoga reda su se zaokrenuli iz položaja GMT svaki na svoju stranu za kut  $\alpha$ .

Postupak s dva rotirajuća vektora omogućuje, uz primjenu dodatnih osovina s utezima, uravnotežavanje sila inercije prvoga reda i njihovih momenata u onim slučajevima kada se to samo pomoću protuutega ba koljenastom vratilu ne može postići. Za uravnotežavanje momenata sila inercije prvoga reda dovoljna je jedna osovina koja se okreće istom brzinom kao i koljenasto vratilo ali u suprotnom smjeru, i koja ima dva utega određene veličine, međusobno postavljena pod kutem od  $180^\circ$  na odgovarajućem uzdužnom razmaku.

### 2.3.3 Uravnoteženje V-motora

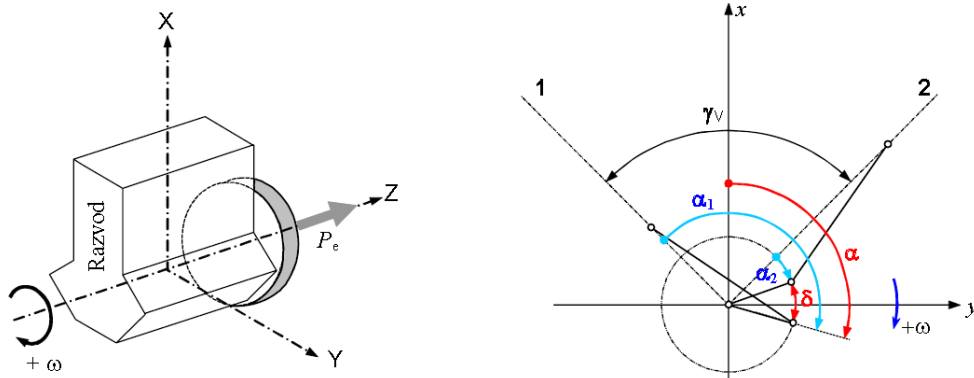
Kod V- motora cilindri su smješteni u dvije ravnine. Za analizu uravnoteženosti postavljaju se tri koordinatna sustava:

- Po jedan lokalni koordinatni sustav u svakom redu cilindara, os x se poklapa sa ravinom kroz uzdužne osi cilindra, u svakoj cilindarskoj ravnini posebno, a os z se poklapa s osi rotacije koljenastog vratila
- Globalni koordinatni sustav ima os x položenu u uzdužnoj, središnjoj ravlini motora



**Slika 14** Prikaz postavljanja 3 koordinatna sustava za analizu V-motora

Kod analize uravnoteženosti promatra se svaki red cilindra kao redni motor u svom koordinatnom sustavu, a potom se rezultati prenose u globalni sustav.



**Slika 15** Globalni koordinatni sustav i kinematička shema V-motora.

Kut između cilindara je  $\gamma_v$ , a kutni razmak osnih koljena (letećih rukavaca) u istom V-elementu je  $\delta$ . Položaj klipnog mehanizma cijelog motora određen je kutom zakreta  $\alpha$  osnog koljena referentnog prvog cilindra u globalnom koordinatnom sustavu.

$$\alpha_1 = \alpha + \frac{\gamma_v}{2} \quad \alpha_2 = \alpha - \frac{\gamma_v}{2} - \delta \quad (1.22)$$

### 2.3.3.1 Sile inercije 1.reda

Cilj nam je pronaći kut  $\gamma_v$  između cilindara kod kojega je motor uravnotežen u pogledu sila inercije 1.reda, ako se problem riješi u jednom V-elementu, riješen je i za cijeli motor.

Sile inercije svakog pojedinog cilindra razmotrit će se najprije u lokalnom koordinatnom sustavu kod kojega se uzdužna os poklapa s uzdužnom osi cilindra, rastaviti će se na komponente u smjeru lokalnih koordinatnih osi. Potom će se tako dobivene komponente prenijeti u globalni koordinatni sustav te u tom sustavu biti postavljeni uvjeti za izračunavanje kuta među cilindrima. Sila inercije oscilirajućih masa biti će prikazana pomoću dva vektora polovičnih amplituda, koji rotiraju svaki na svoju stranu kutnim brzinama ( $\pm \omega$ ).

Ukupna sila inercije 1.cilindra  $F_1$  sastoji se od sile inercije oscilirajućih masa prvoga reda i centrifugalne sile uzrokovane rotirajućim masama rukavca i ramena klipnjače, te rotirajućeg dijela klipnjače.

Komponente sila 1.cilindra u lokalnom i globalnom koordinatnom sustavu:

$$F_{L,X} = 2 \frac{F_{in1}}{2} \cos \alpha_1 + F_{m,rot} \cos \alpha_1 = (F_{in1} + F_{m,rot}) \cos \alpha_1 \quad (1.23)$$

$$F_{L,Y} = F_{m,rot} \sin \alpha_1 \quad (1.24)$$

$$F_{G,X,1} = F_{L,X} \cos \frac{\gamma_v}{2} + F_{L,Y} \sin \frac{\gamma_v}{2} \quad (1.25)$$

$$F_{G,Y,1} = -F_{L,X} \cos \frac{\gamma_v}{2} + F_{L,Y} \sin \frac{\gamma_v}{2} \quad (1.26)$$

Komponente sila 2.cilindra u globalnom sustavu:

$$F_{G,X,2} = F_{L,X} \cos \frac{\gamma_v}{2} + F_{L,Y} \sin \frac{\gamma_v}{2} \quad (1.27)$$

$$F_{G,Y,2} = F_{L,X} \cos \frac{\gamma_v}{2} + F_{L,Y} \sin \frac{\gamma_v}{2} \quad (1.28)$$

Komponente x,y za oba cilindra u V-elementu:

$$F_{G,X} = F_{G,X,1} + F_{G,X,2} \quad F_{G,Y} = F_{G,Y,1} + F_{G,Y,2} \quad (1.29)$$

Nakon uvrštavanja kutova i sređivanja dobiva se slijedeći oblik:

$$F_{G,X} = \left[ F_{in1} \cos \left( \gamma_v + \frac{\delta}{2} \right) \cos \frac{\gamma_v}{2} + F_{m,rot} \cos \frac{\delta}{2} \right] 2 \cos \left( \alpha + \frac{\delta}{2} \right) \quad (1.30)$$

$$F_{G,Y} = \left[ F_{in1} \sin \left( \gamma_v + \frac{\delta}{2} \right) \sin \frac{\gamma_v}{2} + F_{m,rot} \cos \frac{\delta}{2} \right] 2 \sin \left( \alpha + \frac{\delta}{2} \right) \quad (1.31)$$

Ako je V-element potpuno uravnotežen u pogledu sila inercije 1.reda tada su te komponente jednake nuli, a to će biti ispunjeno ako su izrazi u uglatim zagradama jednaki nuli, nakon trigonometrijskih transformacija dobiva se slijedeći izraz:

$$F_{in1} \left[ \cos \frac{\delta}{2} + \cos \left( \gamma_v + \frac{\delta}{2} \right) \right] + F_{m,rot} \cos \frac{\delta}{2} = 0 \quad (1.32)$$

$$F_{in1} \left[ \cos \frac{\delta}{2} - \cos \left( \gamma_v + \frac{\delta}{2} \right) \right] + F_{m,rot} \cos \frac{\delta}{2} = 0 \quad (1.33)$$

Ako se protutezi na koljenastom vratilu dimenzioniraju na odgovarajući način ovo nam je ispunjeno za:

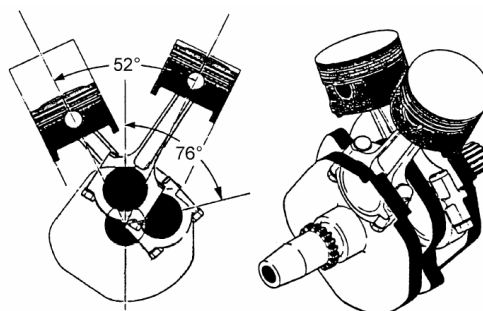
$$\cos \left( \gamma_v + \frac{\delta}{2} \right) = 0 \quad (1.34)$$

Iz izraza nam proizlaze dva moguća rješenja:

$$1. \quad \delta = \pi - 2\gamma_v \quad (1.35)$$

$$2. \quad \delta = 0 \quad \gamma_v = \frac{\pi}{2} \quad (1.36)$$

Iz dobivenih izraza možemo zaključiti da kutni razmak između letećih rukavaca koljenastog vratila mora imati točno određenu vrijednost. Ako nema pomaka rukavaca tada je V-element potpuno uravnotežen glede sila inercija 1.reda za vrijednost kuta među cilindrima od 90°.



**Slika 16** Honda V-2 motor s kutom između cilindara i pomaknutim rukavcima za potpuno uravnoteženje sila inercije 1.reda.

## 2.4 Redoslijed i razmaci paljenja

Redoslijed paljenja je redoslijed po kome cilindri pale jedan za drugim. On je određen brojem taktova motora, brojem i rasporedom cilindara te rasporedom koljena koljenastog vratila. Redoslijed paljenja je rezultat kompromisa između zahtjeva za jednakim razmacima paljenja radi jednoličnijeg toka rezultirajuće tangencijalne sile svih cilindara, zahtjeva za što boljim uravnoteženjem sila inercija i momenata sila inercije masa koje se gibaju pravocrtno uzimajući pritom i namjenu motora, zahtjeva za povoljnijim opterećenjem i jednostavnijom izvedbom koljenastog vratila. U tu svrhu treba u većini slučajeva što jednoličnije razmjestiti paljenje pojedinih cilindara duž osnovnog perioda jednog radnog procesa.

Pravila za redne motore:

- Broj mogućih redoslijeda paljenja kod rednih 4-taktnih motora sa dvostrukim zrakama u zvijezdi koljena i sa  $z$  koljena iznosi

$$2^{\frac{z}{2}-1} \quad (1.37)$$

- Kod 4-taktnih motora sa parnim brojem koljena dobivaju se jednaki razmaci paljenja između pojedinih cilindara ako zvijezda koljena ima dvostruke zrake
- Redoslijed paljenja dobije se tako da zvijezda koljena ostane nepomična, a os cilindra se zakrene suprotno od smjera vrtnje. Obilazeći zvijezdu koljena dva puna okretaja ( kod 2T-motora 1 okretaj) treba po jednom očitati svako koljeno. Redoslijed očitavanja predstavlja redoslijed paljenja pojedinih cilindara
- Razmak paljenja iznosi:

$$\begin{aligned} \alpha_{rp} &= \frac{4\pi}{z} && \text{kod 4-taktnih motora} \\ \alpha_{rp} &= \frac{2\pi}{z} && \text{kod 2-taktnih motora} \end{aligned} \quad (1.38)$$

### 3 ANALIZA URAVNOTEŽENOSTI KLIPNIH MOTORA

#### 3.1 Redni motori

U proračunu su obuhvaćeni i redni motori sa 2,3,4,5 i 6 cilindara, svaki motor je riješen analitički u matematičkom programu Mathcad i metodom rotirajućih vektora. Matematička rješenja sa svim dijagramima nalaze se u prilogu rada.

##### 3.1.1 2-cilindarski redni motor

Izvedba 2-cilindarskog rednog motora je jednostavna i jeftina, najviše se ugrađuje u motocikle kao što su Yamaha TMAX, Honda Silver Wing, i općenito veliki skuteri. . Najviše je korišten 50-ih godina prošlog stoljeća kad je bio ugrađivan u slijedeće automobile: Fiat 500, NSU Prinz, Mitshubishi Minica..



**Slika 17** S lijeva na desno: NSU Prinz, ugrađeni 2-cilindarski motor u Fiat 500, Honda Silver Wing

Analizirana su dva redna 2-cilindarska motora, jedan koji ima koljena koljenastog vratila u jednoj ravnini ( $360^\circ$ ) i motor kod kojega su koljena pod kutom od  $180^\circ$ .

##### 3.1.1.1 2-cilindarski redni motor sa koljenima koljenastog vratila u jednoj ravnini

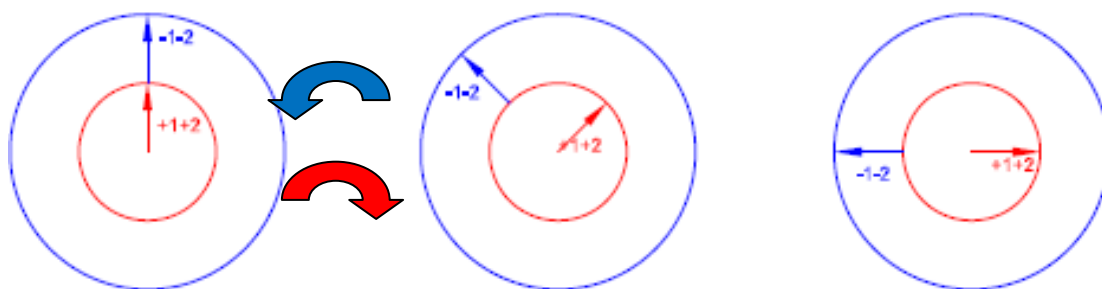
Metodom rotirajućih vektora analiziran je motor za slijedeće zakrete kuta referentnog cilindra:  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$

1.red sila inercije

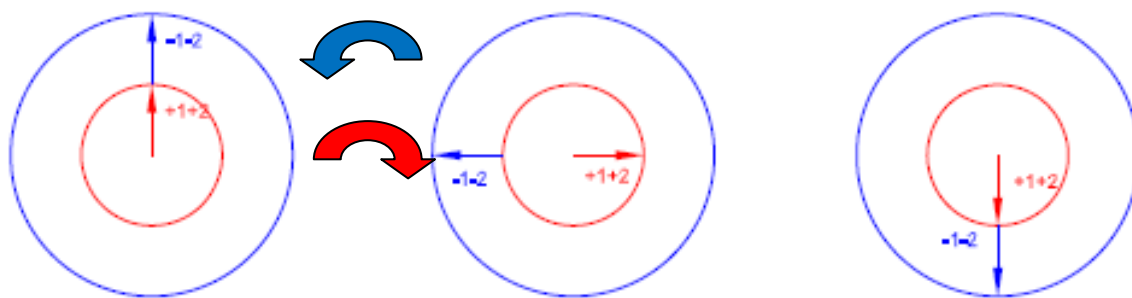
pozitivni polovični vektor rotira u smjeru **crvene** strelice sa  $+\omega$

negativni polovični vektor rotira u smjeru **plave** strelice sa  $-\omega$

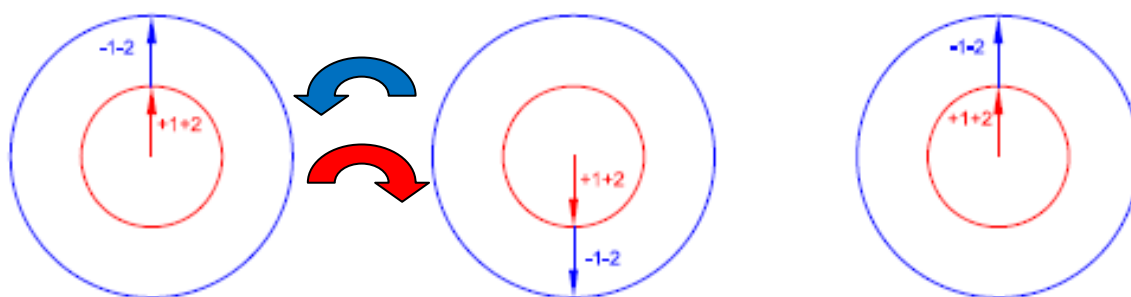
$\alpha=0,45,90$



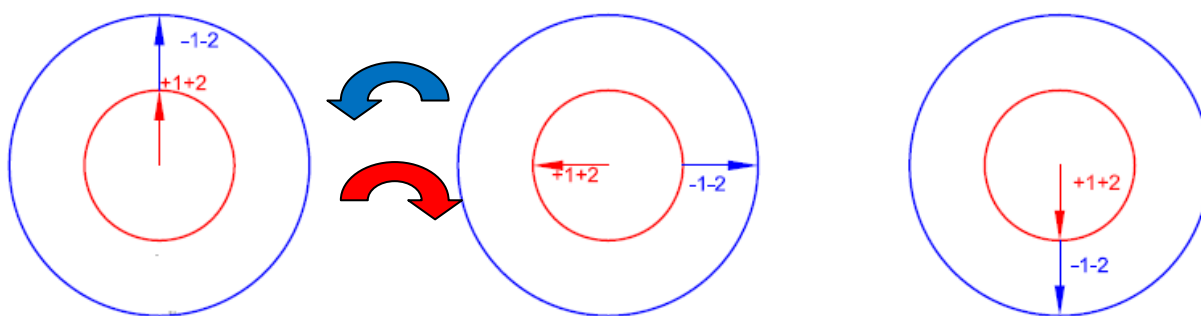
## 2.red sila inercije



## 4.red sila inercije

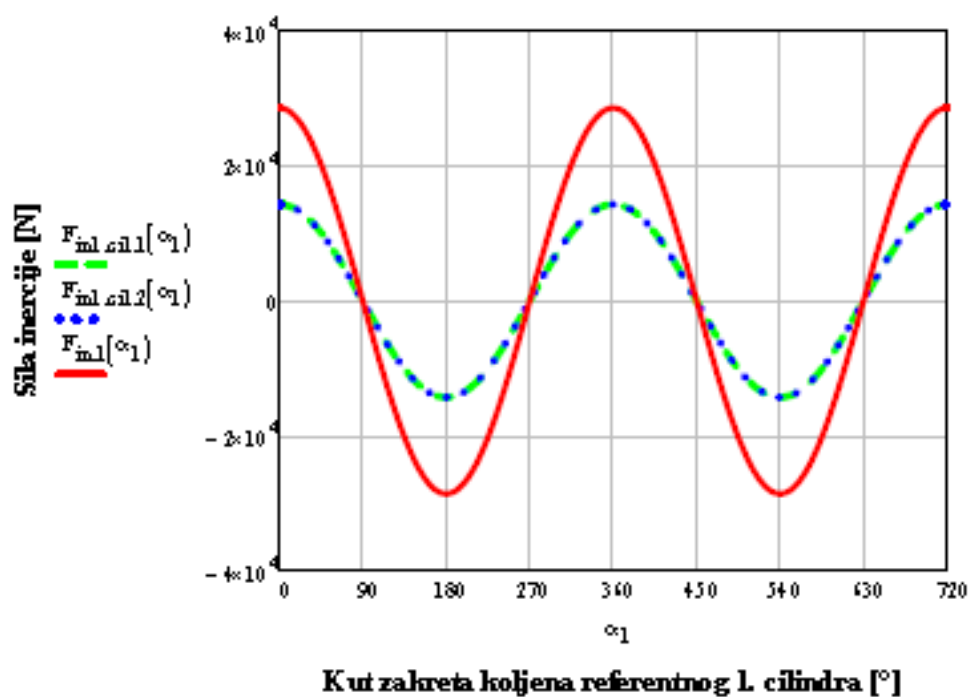


## 6.red sila inercije

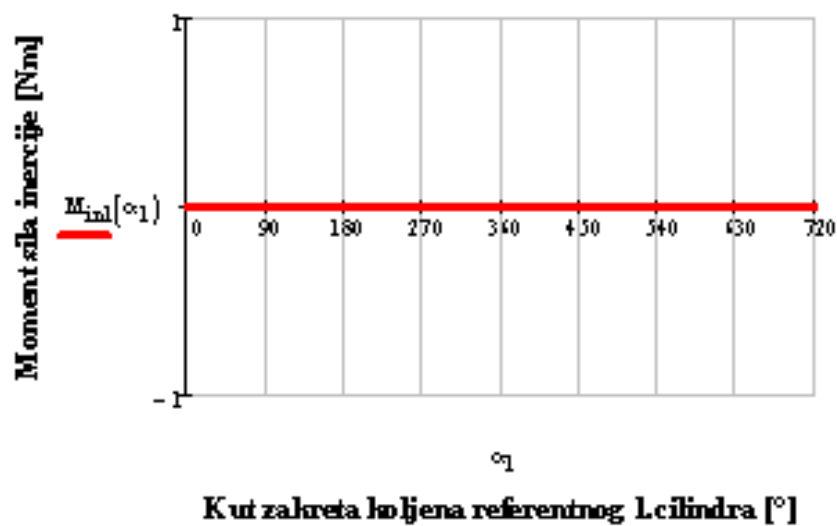


**Slika 18** Raspored polovičnih vektora sile inercije dobivenih za 1.,2.,4. 6.red sila inercije

Dijagrami sila inercije i momenta sile inercije dobiveni analitičkim putem.



Slika 19 Dijagram sila inercije 1.reda

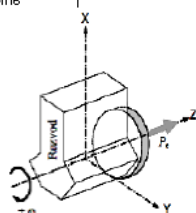


Slika 20 Moment sile inercije 1 reda,uravnoteženo

**Tabela 1° Usporedba rezultata za 2-cilindarski redni motor – 360°**

Sile inercije Momenti sila inercije		Graficka analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	$2F_{in1}$ ↑↓	$2F_{in1}$ ↑↓	$2F_{in1}$ ↑↓		$2F_{in1}$	$2F_{in1}$	$2F_{in1}$
	$M_{in1}$	0	0	0		0	0	0
2.red	$F_{in2}$	$2F_{in2}$ ↑↓	$2F_{in2}$	$2F_{in2}$ ↑↓		$2F_{in2}$	$2F_{in2}$	$2F_{in2}$
	$M_{in2}$	0	0	0		0	0	0
4.red	$F_{in4}$	$2F_{in4}$ ↑↓	$2F_{in4}$	$2F_{in4}$ ↑↓		$2F_{in4}$	$2F_{in4}$	$2F_{in4}$
	$M_{in4}$	0	0	0		0	0	0
6.red	$F_{in6}$	$2F_{in6}$ ↑↓	$2F_{in6}$	$2F_{in6}$ ↑↓		$2F_{in6}$	$2F_{in6}$	$2F_{in6}$
	$M_{in6}$	0	0	0		0	0	0

↑	Slobodna sila
↑	Slobodni moment
↑↓	Oscilira
↔	Oscilira i mijenja amplitudu
↻	Rotira pozitivno ili negativno





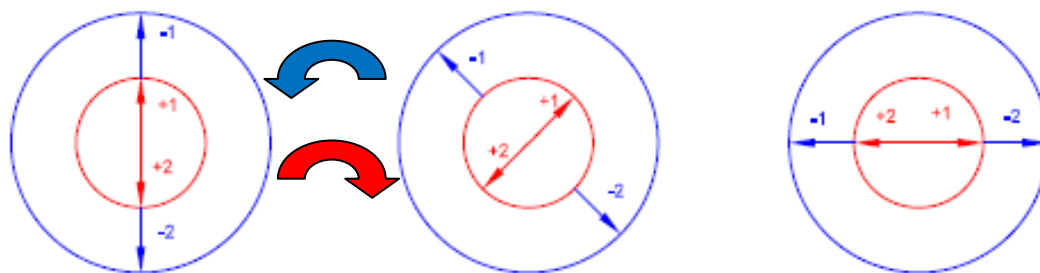
### 3.1.1.2 2-cilindarski redni motor sa koljenima koljenastog vratila pod kutom $180^\circ$

Metodom rotirajućih vektora analiziran je motor za slijedeće zakrete kuta referentnog cilindra:  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$

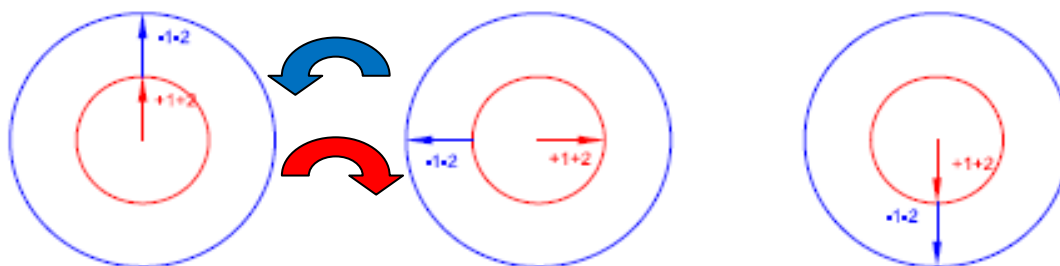
pozitivni polovični vektor rotira u smjeru **crvene** strelice sa  $+\omega$

negativni polovični vektor rotira u smjeru **plave** strelice sa  $-\omega$

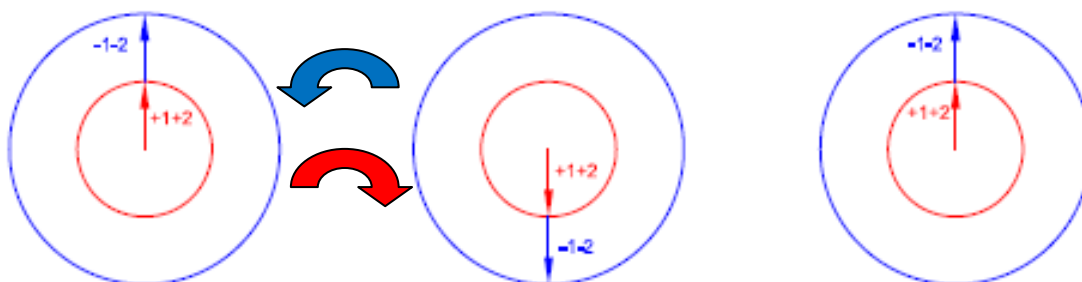
1.red



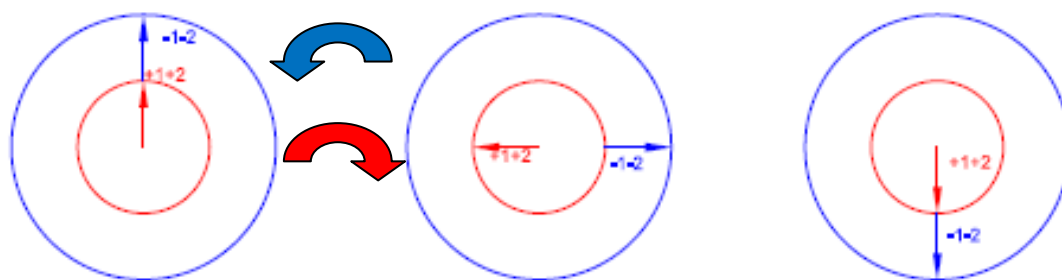
2.red



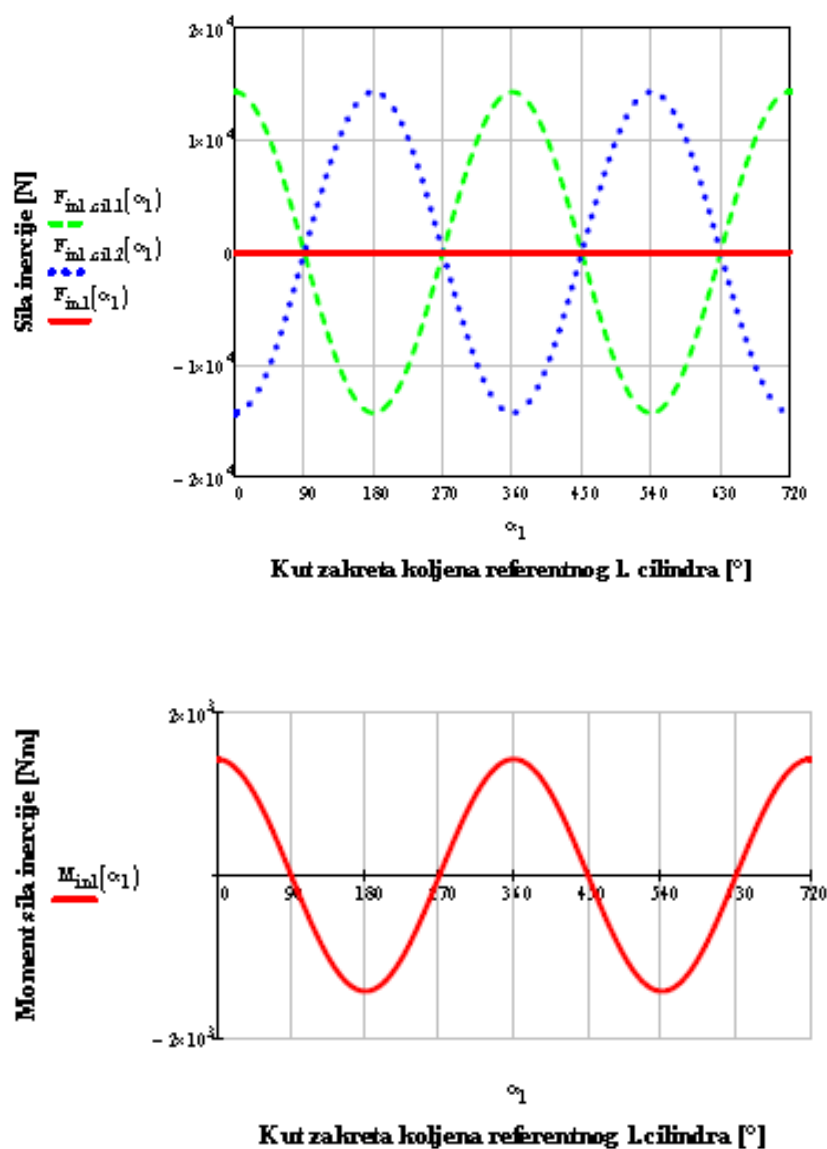
4.red



6.red

















**Slika 21** Raspored polovičnih vektora sila inercije dobivenih za 1.,2.,4.,6. red

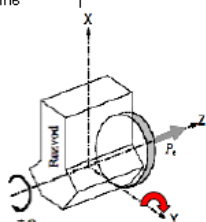


**Slika 22** Dijagrami sila i momenata inercije

**Tabela 2 Usporedba rezultata za 2-cilindarski redni motor -180°**

Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0		0	0	0
	$M_{in1}$	$2F_{in1}L$ 	$2F_{in1}L$ 	$2F_{in1}L$ 		$2F_{in1}L$	$2F_{in1}L$	$2F_{in1}L$
2.red	$F_{in2}$	$2F_{in2}$ 	$2F_{in2}$	$2F_{in2}$ 		$2F_{in2}$	$2F_{in2}$	$2F_{in2}$
	$M_{in2}$	0	0	0		0	0	0
4.red	$F_{in4}$	$2F_{in4}$ 	$2F_{in4}$	$2F_{in4}$ 		$2F_{in4}$	$2F_{in4}$	$2F_{in4}$
	$M_{in4}$	0	0	0		0	0	0
6.red	$F_{in6}$	$2F_{in6}$ 	$2F_{in6}$	$2F_{in6}$ 		$2F_{in6}$	$2F_{in6}$	$2F_{in6}$
	$M_{in6}$	0	0	0		0	0	0

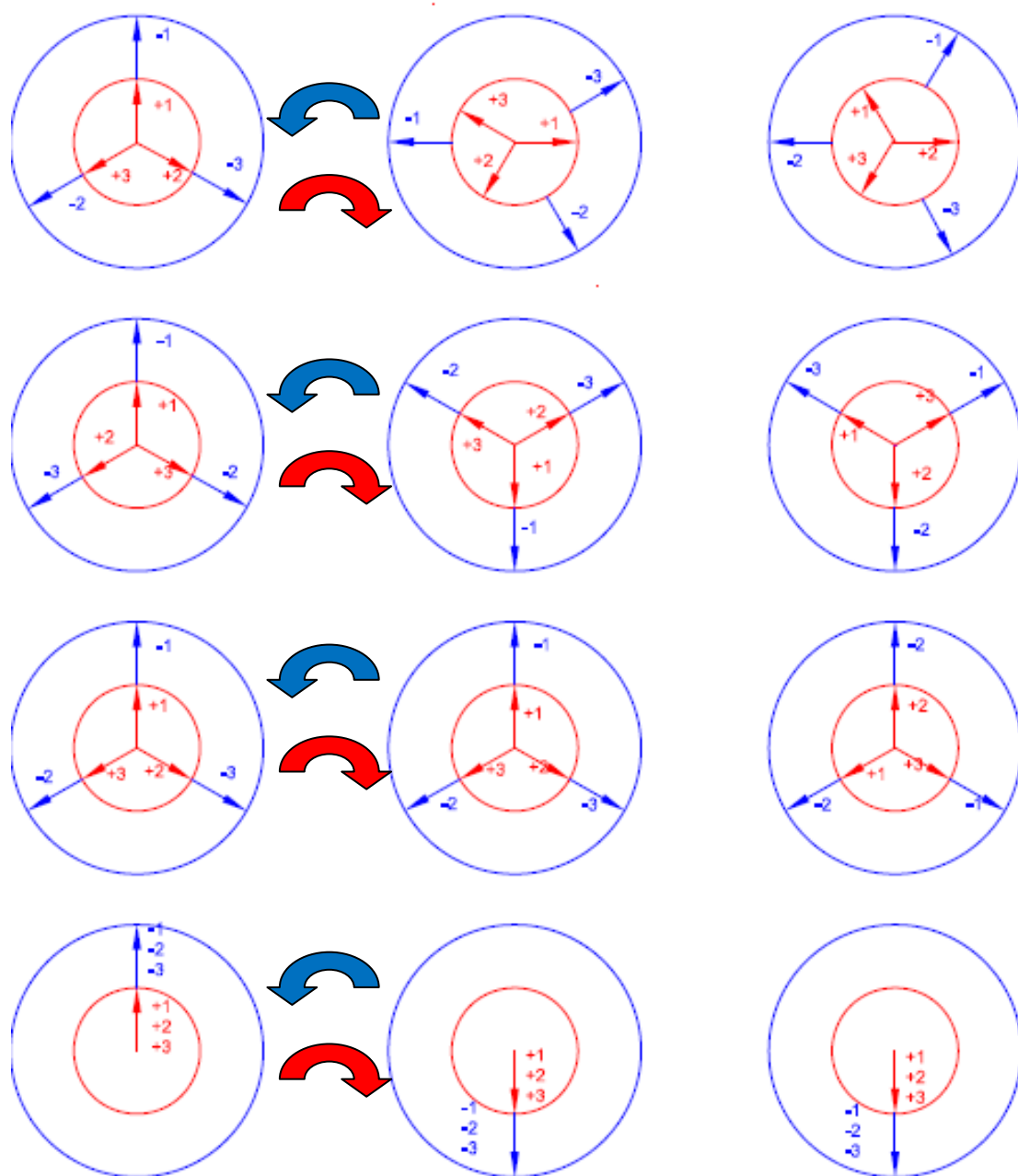
	Slobodna sila
	Slobodni moment
	Oscilira
	Oscilira i mijenja amplitudu
	Rotira pozitivno ili negativno



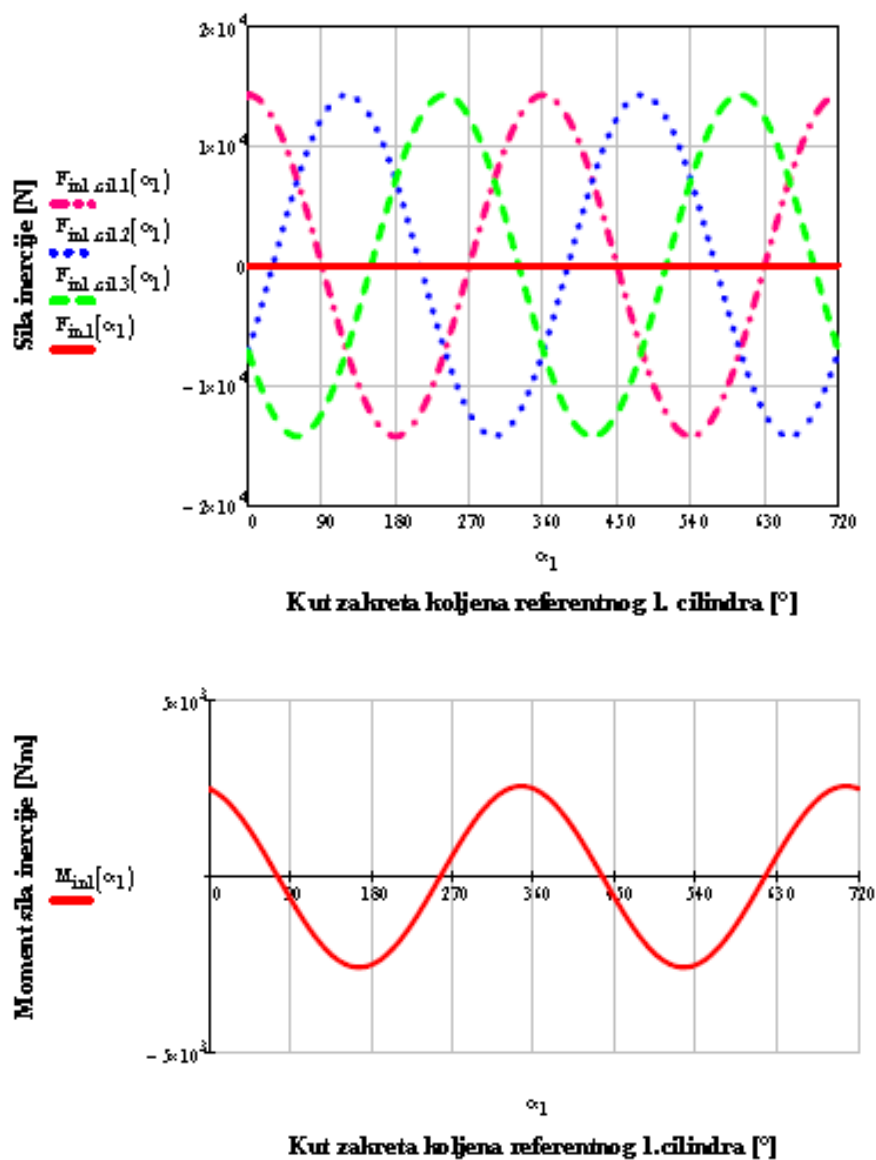
### 3.1.2 3-cilindarski redni motor

Henry Ford razvio je kasnih 1930 i ranih 1940 godina 3-cilindarski redni motor, no zbog nedostatka potražnje za malim vozilima nikada nije zaživio. Primjena u današnje vrijeme je vrlo šarolika jer nalazi se gotovo u svim manjim, gradskim vozilima, no primjenu je našao i u poljoprivrednim strojevima, Perkins.


**Slika 23 Audi A2 i motor Suzuki F5A**



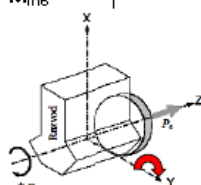
**Slika 24** Raspored polovičnih vektora sile inercije za 1.,2.,4.,6 red



**Slika 25** Dijagrami sila i momenta inercije 1.reda

**Tabela 3** Usporedba rezultata za 3-cilindarski redni motor

Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	$\sqrt{3}F_{in1}L$ $\updownarrow$	$\sqrt{3}F_{in1}L$ $\updownarrow$	$\sqrt{3}F_{in1}L$ $\updownarrow$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$
2.red	$F_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	$\sqrt{3}F_{in2}L$ $\updownarrow$	$\sqrt{3}F_{in2}L$ $\updownarrow$	$\sqrt{3}F_{in2}L$ $\updownarrow$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$
4.red	$F_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in4}$	0	0	0		0	0	0
6.red	$F_{in6}$	$3F_{in6}$ $\updownarrow$	$3F_{in6}$	$3F_{in6}$ $\updownarrow$				
	$M_{in6}$	0	0	0		0	0	0



### 3.1.3 4-cilindarski redni motor – koljena u jednoj ravlini

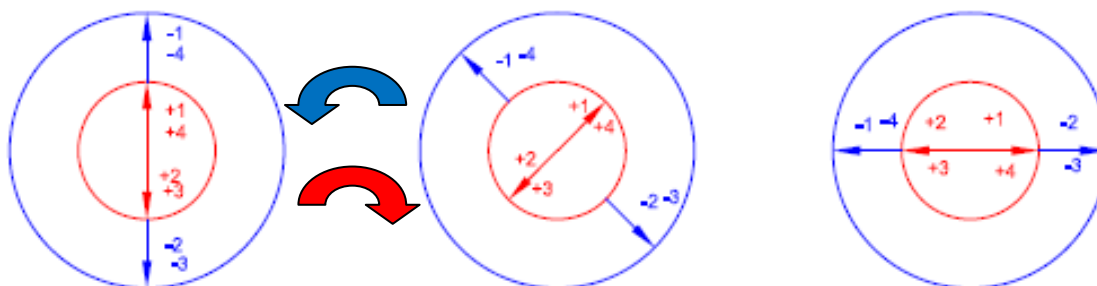
4-cilindarski motor je jedan od najrašireniji i najviše ugrađivanih motora u automobilskoj industriji. Uravnotežen je glede sila i momenata inercije 1.reda, neuravnoteženost se javlja kod sila inercije drugog i viših redova.



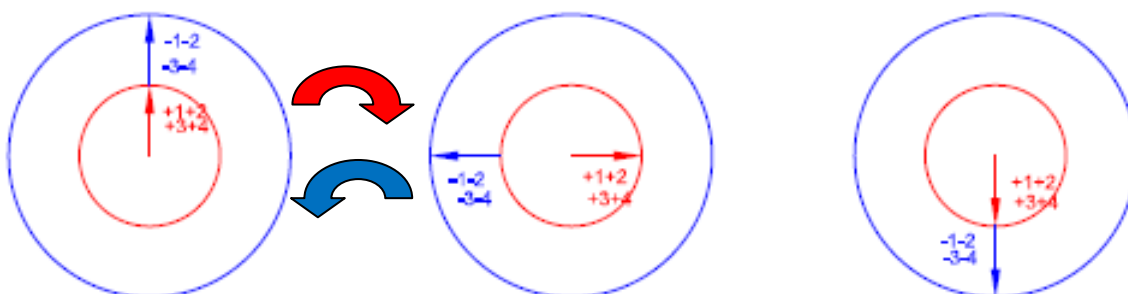
**Slika 26** Porsche 944 iz 4-cilindarskog motora dobio je volumen od 3.0L, desno je presjek Renault-Nissanovog motora

pozitivni polovični vektor rotira u smjeru **crvene** strelice sa  $+\omega$   
 negativni polovični vektor rotira u smjeru **plave** strelice sa  $-\omega$

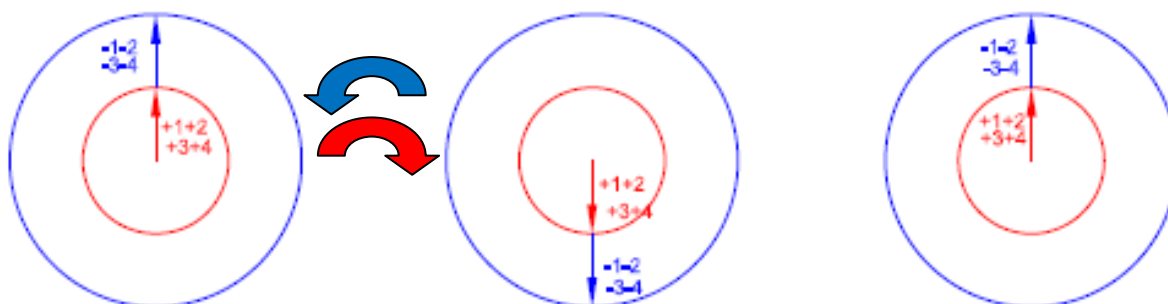
1.red



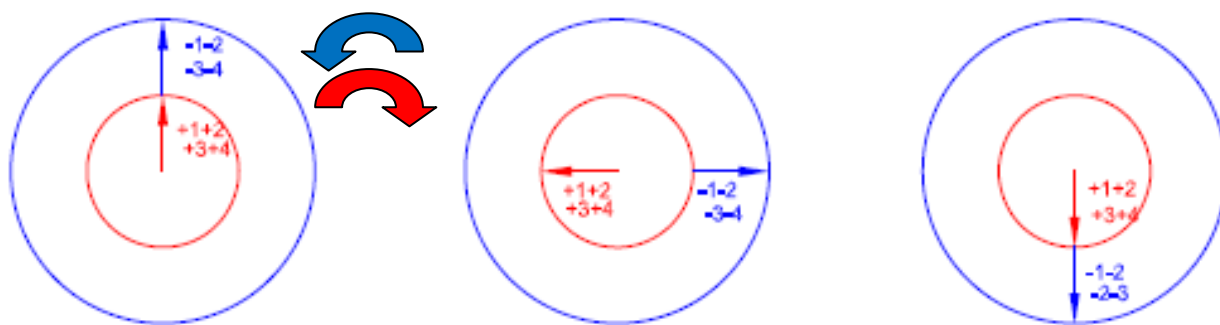
2.red



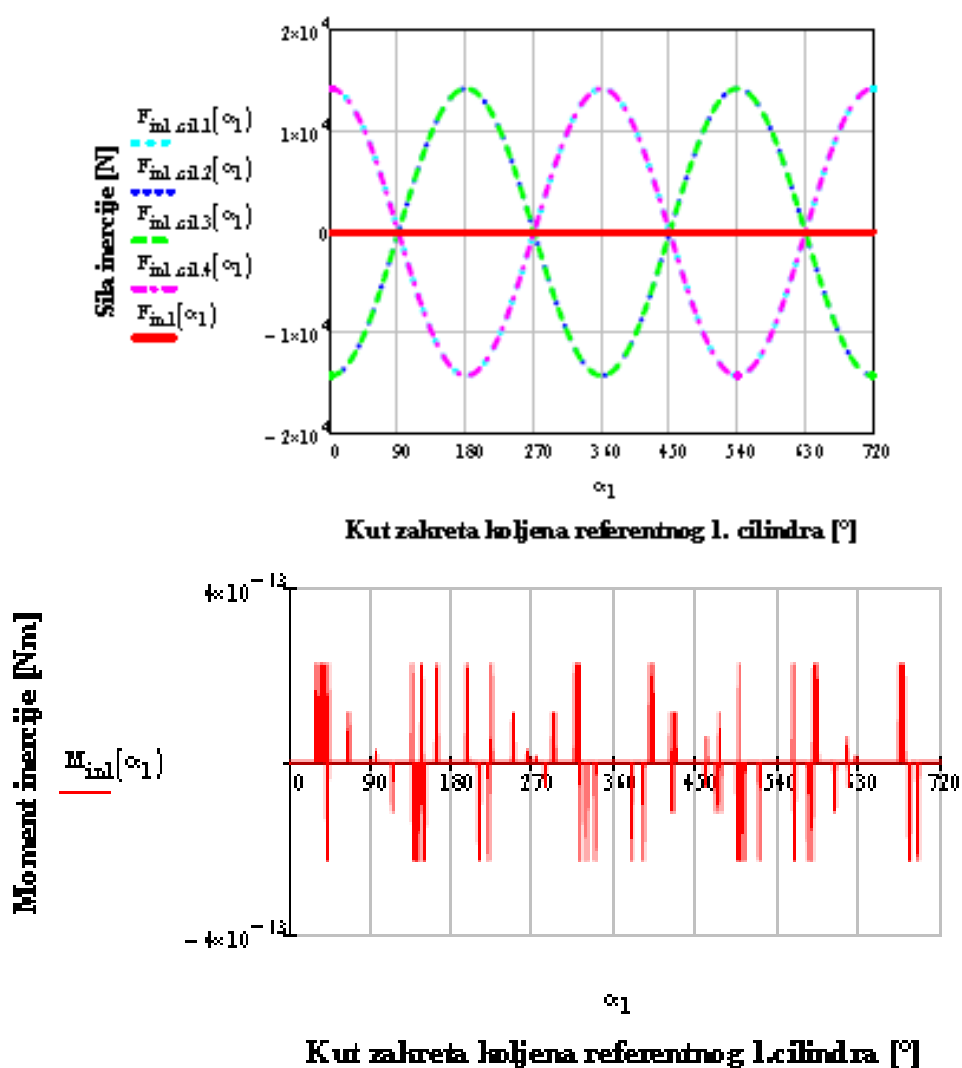
4.red



6.red



Slika 27 Raspored polovičnih vektora sila inercije za 1.,2.,4.,6.red

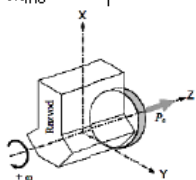


Slika 28 Dijagram sila i momenta inercije 1.reda



**Tabela 4** Usporedba rezultata za 4-cilindarski redni motor – koljena u jednoj ravni

Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
2.red	$F_{in2}$	$4F_{in2}$ ↑↓	$4F_{in2}$ ↑↓	$4F_{in2}$ ↑↓	$4F_{in2}$	$4F_{in2}$	$4F_{in2}$	$4F_{in2}$
	$M_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
4.red	$F_{in4}$	$4F_{in4}$ ↑↓	$4F_{in4}$ ↑↓	$4F_{in4}$ ↑↓	0	0	0	0
	$M_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
6.red	$F_{in6}$	$4F_{in6}$ ↑↓	$4F_{in6}$ ↑↓	$4F_{in6}$ ↑↓	0	0	0	0
	$M_{in6}$	0	0	0	0	0	0	0

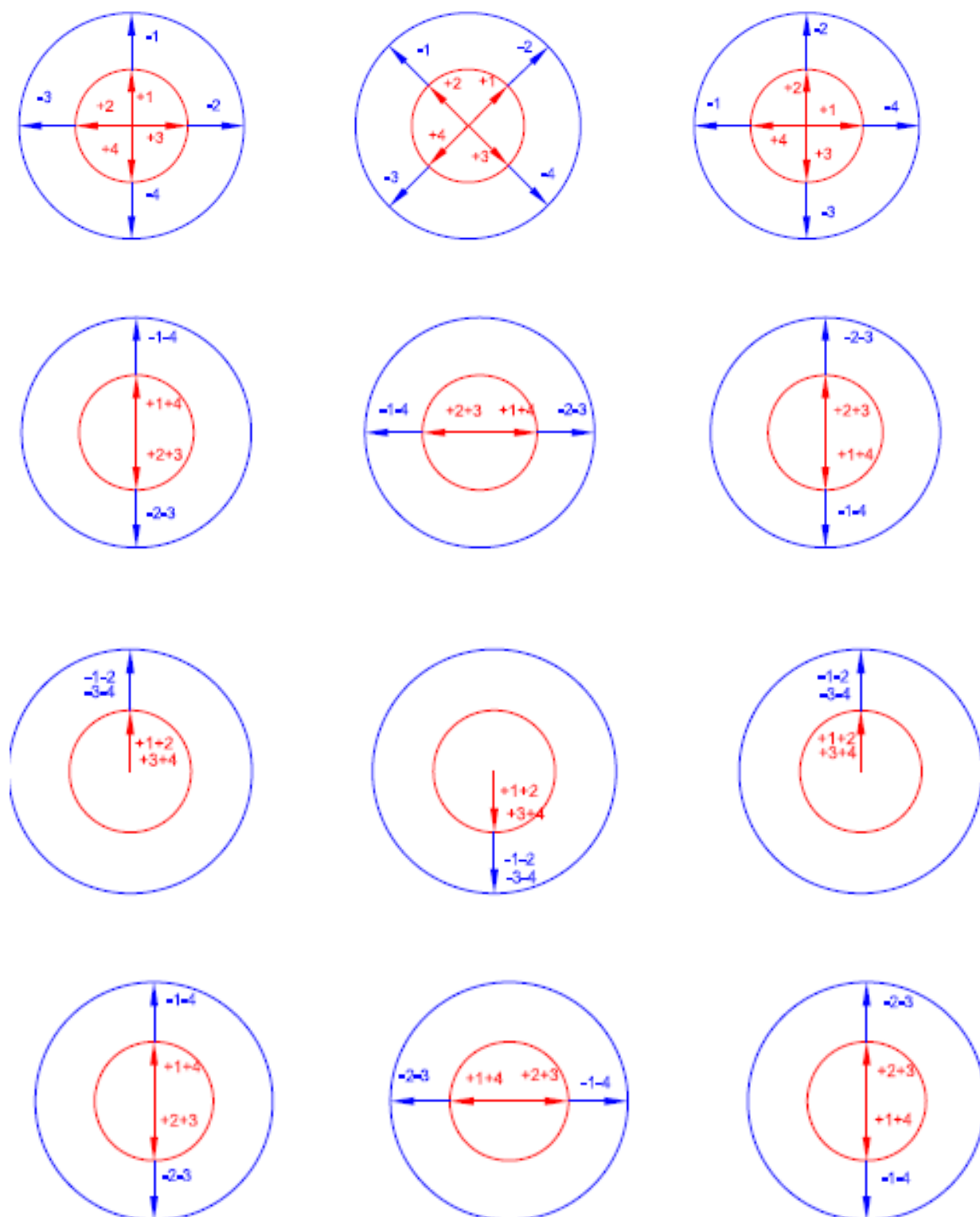


### 3.1.4 4-cilindarski redni motor sa cross-plane koljenastim vratilom

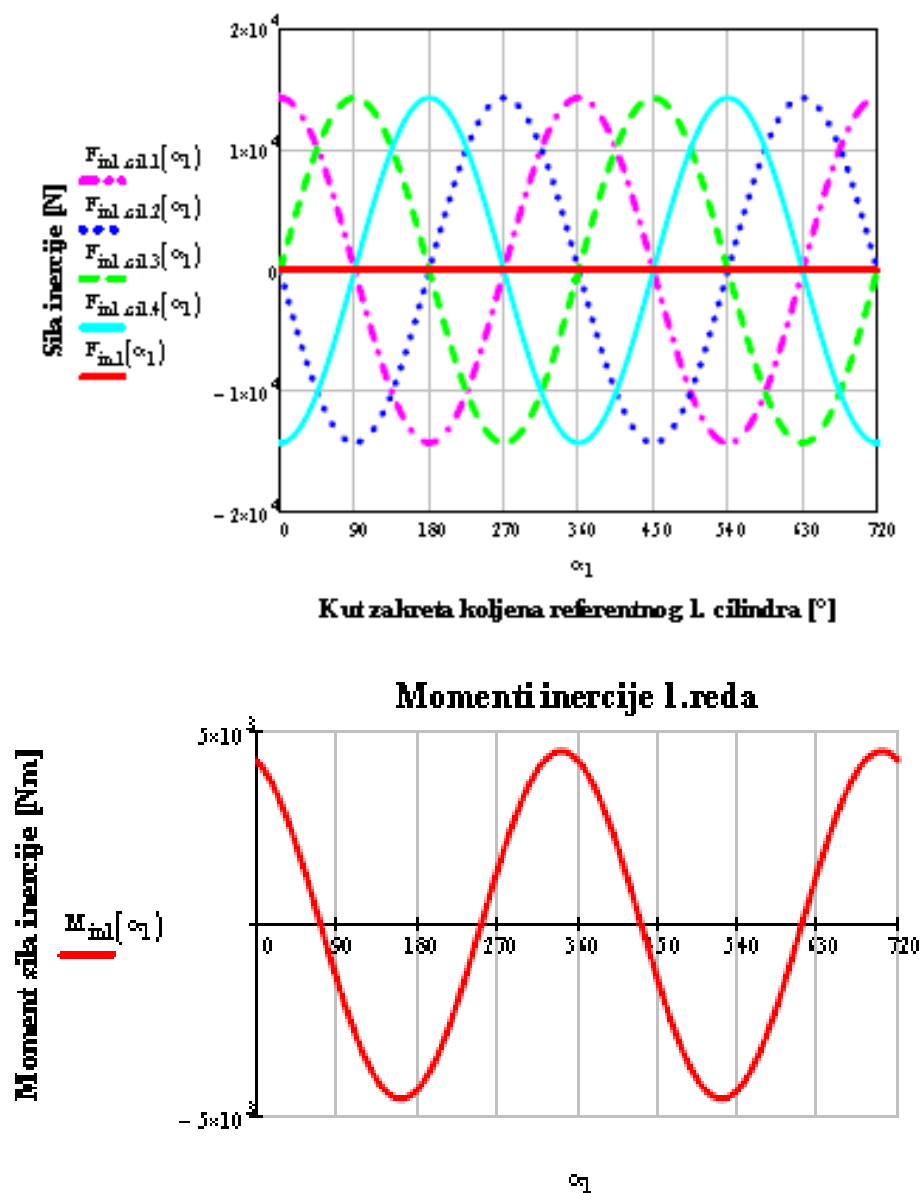
Tvrtka Yamaha razvila je redni 4-cilindarski motor za motocikl sa brzinom vrtnje preko  $12000 \text{ min}^{-1}$ , koljena su raspoređena u dvije ravnine koje se sijeku pod  $90^\circ$ . Zbog ovakvog rasporeda koljena utjecaj sile plinova pri visokim brzinama vrtnje na ukupan moment motora znatno veći nego kod konvencionalnog motora, kod kojeg u rezultirajućem momentu svih cilindara dominiraju sile inercije oscilirajućih masa, a to omogućuje vozaču da ručicom gasa znatno bolje upravlja motociklom vožnjom kroz zavoj.

**Slika 29** Yamaha R1 2013, primjer cross – plane koljenastog vratila

pozitivni polovični vektor rotira u smjeru **crvene** strelice sa  $+\omega$   
 negativni polovični vektor rotira u smjeru **plave** strelice sa  $-\omega$



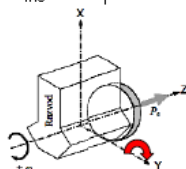
**Slika 30** Raspored polovičnih vektora sile inercije po redovima



**Slika 31** Dijagrami sila i momenata inercije

**Tabela 5** Usporedba rezultata za cross-plane

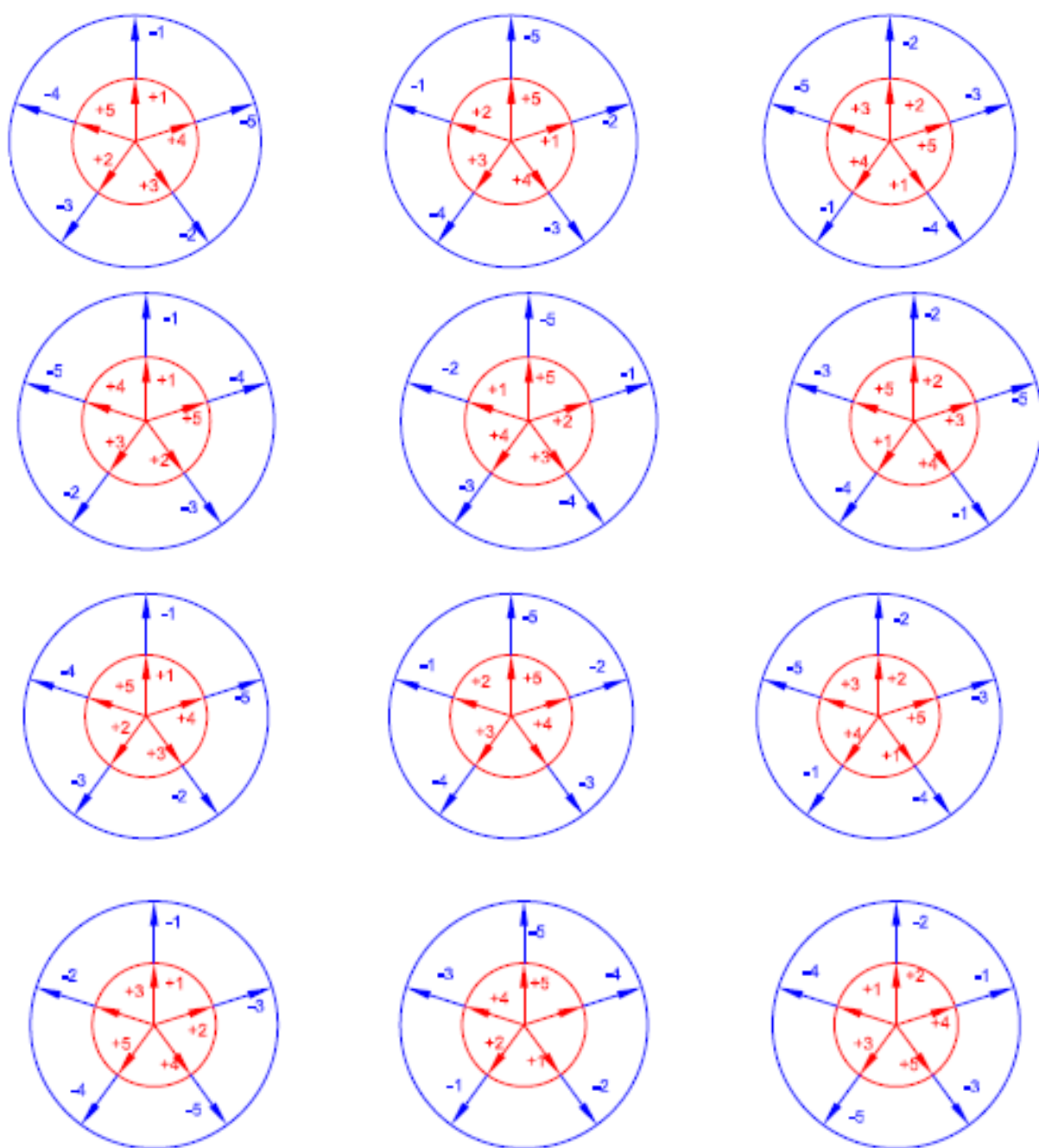
Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	$\sqrt{10} F_{in1} L$	$\sqrt{10} F_{in1} L$	$\sqrt{10} F_{in1} L$	0	0	0	0
2.red	$F_{in2}$	0	0	$4F_{in2}$	0	0	0	0
	$M_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
4.red	$F_{in4}$	$4F_{in4}$	$4F_{in4}$	$4\sqrt{2}F_{in4}$	0	0	0	0
	$M_{in4}$	0	0	$2\sqrt{2}F_{in4}$	0	0	0	0
6.red	$F_{in6}$	0	0	$4F_{in6}$	0	0	0	0
	$M_{in6}$	0	0	0	0	0	0	0



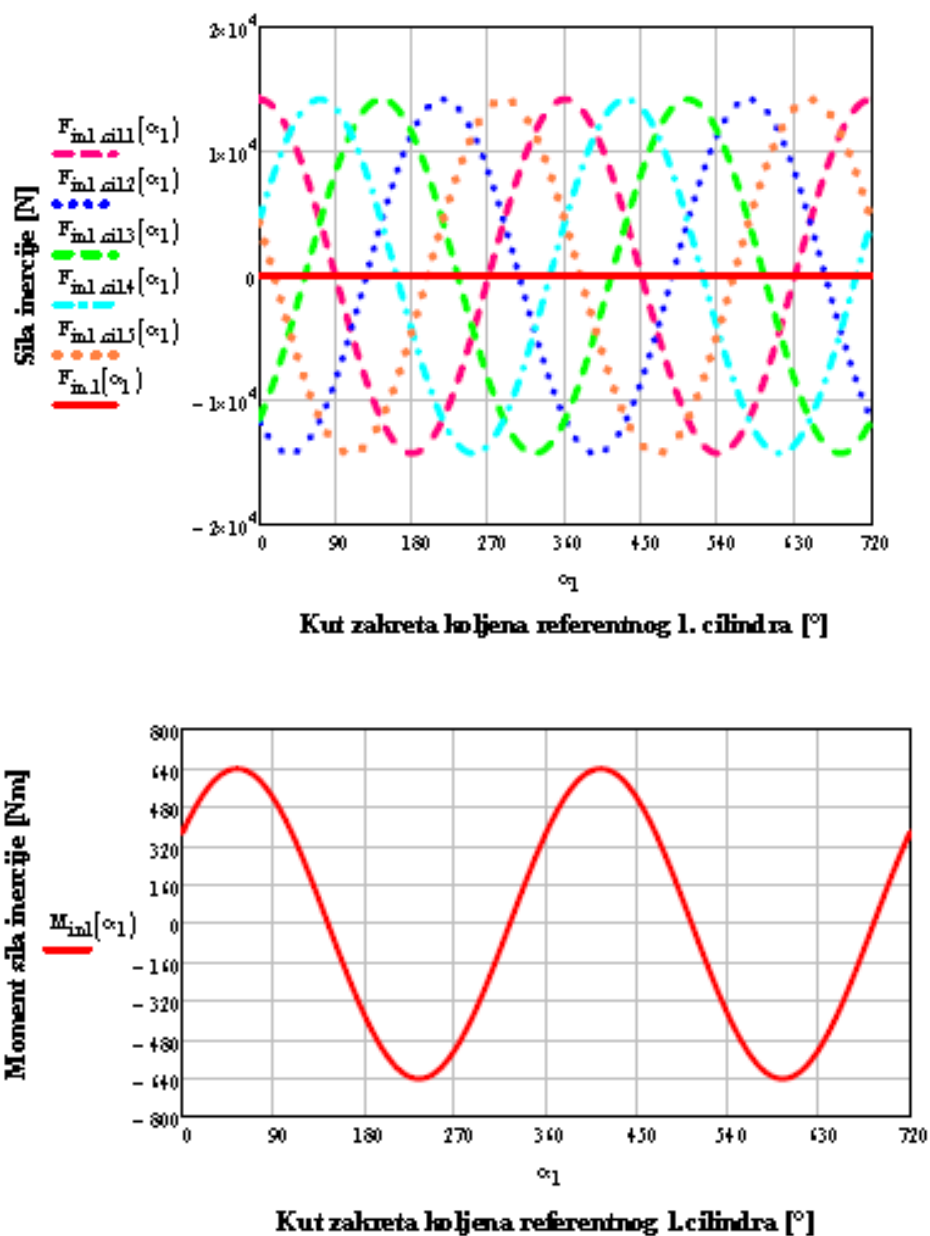
U literaturi nema rezultata za ovakav primjer motora, no kako ima za V8, a zvijezda koljena je ista dolazi se do zaključka da su dobiveni rezultati točni.

### 3.1.5 5-cilindarski redni motor


**Slika 32** Primjer 5-cilindarskog motora ugrađenog u Volvo



**Slika 33** Raspored polovičnih vektora sila inercije po redovima

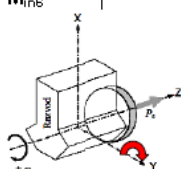


**Slika 34** Dijagrami sila i momenta inercije prvog reda

**Tabela 6 Usporedba rezultata za 5-cilindarski redni motor**

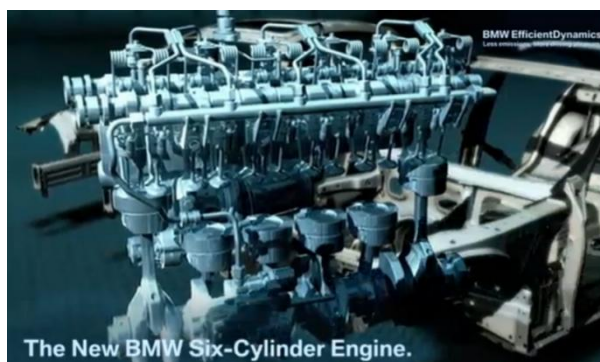
Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	$0,449 F_{in1}L$ ↑↓	$0,449 F_{in1}L$ ↑↓	0	$0,449 F_{in1}L$	$0,449 F_{in1}L$	$0,449 F_{in1}L$	$0,449 F_{in1}L$
2.red	$F_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	$4,98 F_{in2}L$ ↑↓	$4,98 F_{in2}L$ ↑↓	0	$4,98 F_{in2}L$	$4,98 F_{in2}L$	$4,98 F_{in2}L$	$4,98 F_{in2}L$
4.red	$F_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in4}$	$0,449 F_{in4}L$ ↑↓	$0,449 F_{in4}L$ ↑↓	0	0	0	0	0
6.red	$F_{in6}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in6}$	$0,449 F_{in6}L$ ↑↓	$0,449 F_{in6}L$ ↑↓	0	0	0	0	0

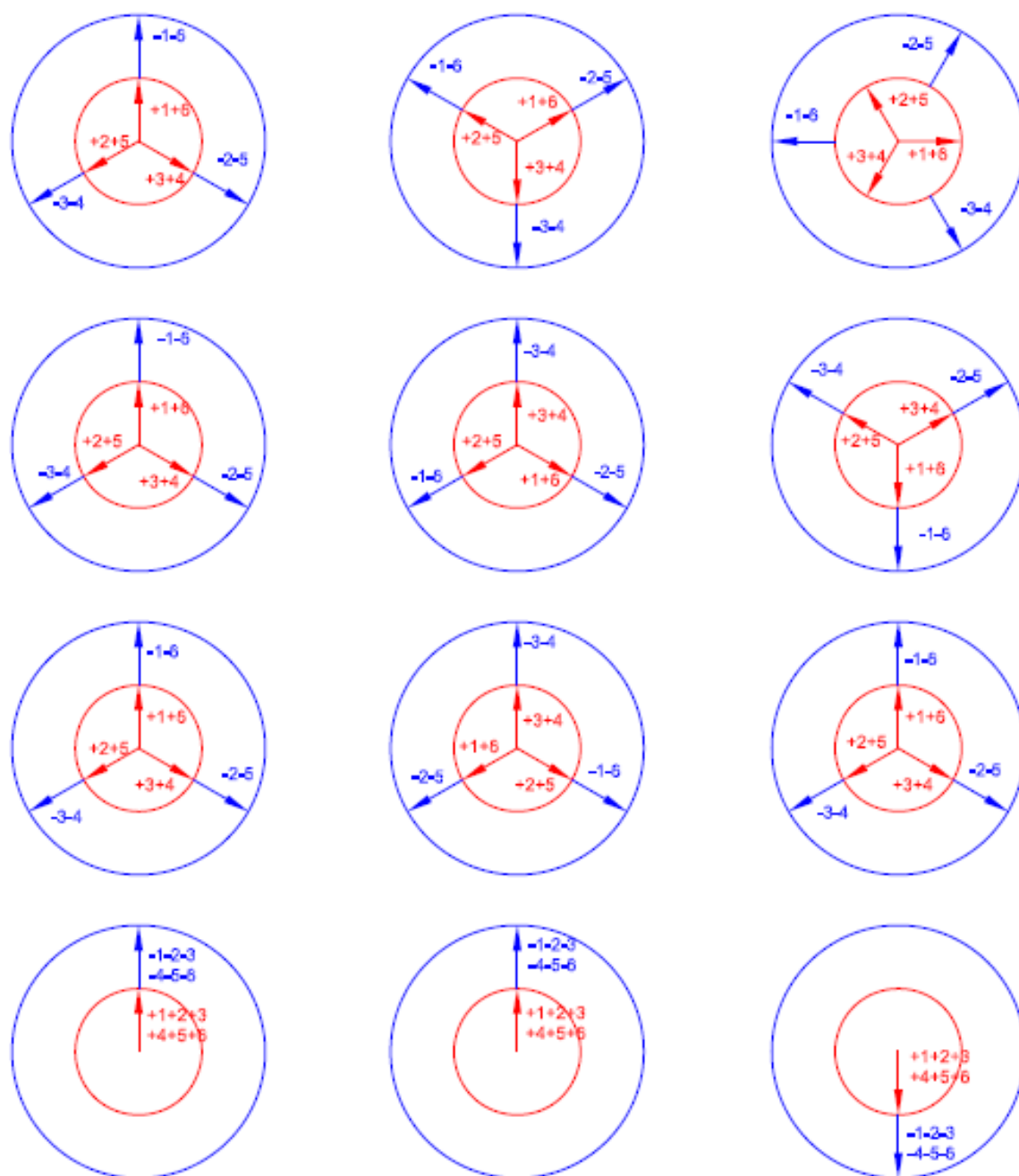
↑	Slobodna sila
↑↓	Slobodni moment
↑↓	Oscilira
↔	Oscilira i mijenja amplitudu
↺↻	Rotira pozitivno ili negativno



### 3.1.6 6 cilindarski redni motor

Potpuno uravnotežen do šestog reda sila inercije, najbolja izvedba motora. No zbog velikih dimenzija ugrađuje se za stražnji pogon.


**Slika 35** BMW-ov redni 6 cilindarski motor

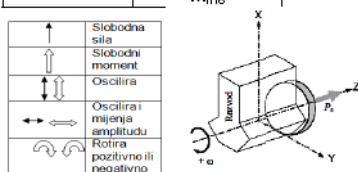


**Slika 36** Raspored rotirajućih vektora sila inercije po redovima



**Tabela 7** Usporedba rezultata za 6-cilindarski redni motor

Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
2.red	$F_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
4.red	$F_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
6.red	$F_{in6}$	$6F_{in6}$ ↑↓	$6F_{in6}$ ↑↓	$6F_{in6}$ ↑↓	0	0	0	0
	$M_{in6}$	0	0	0	0	0	0	0



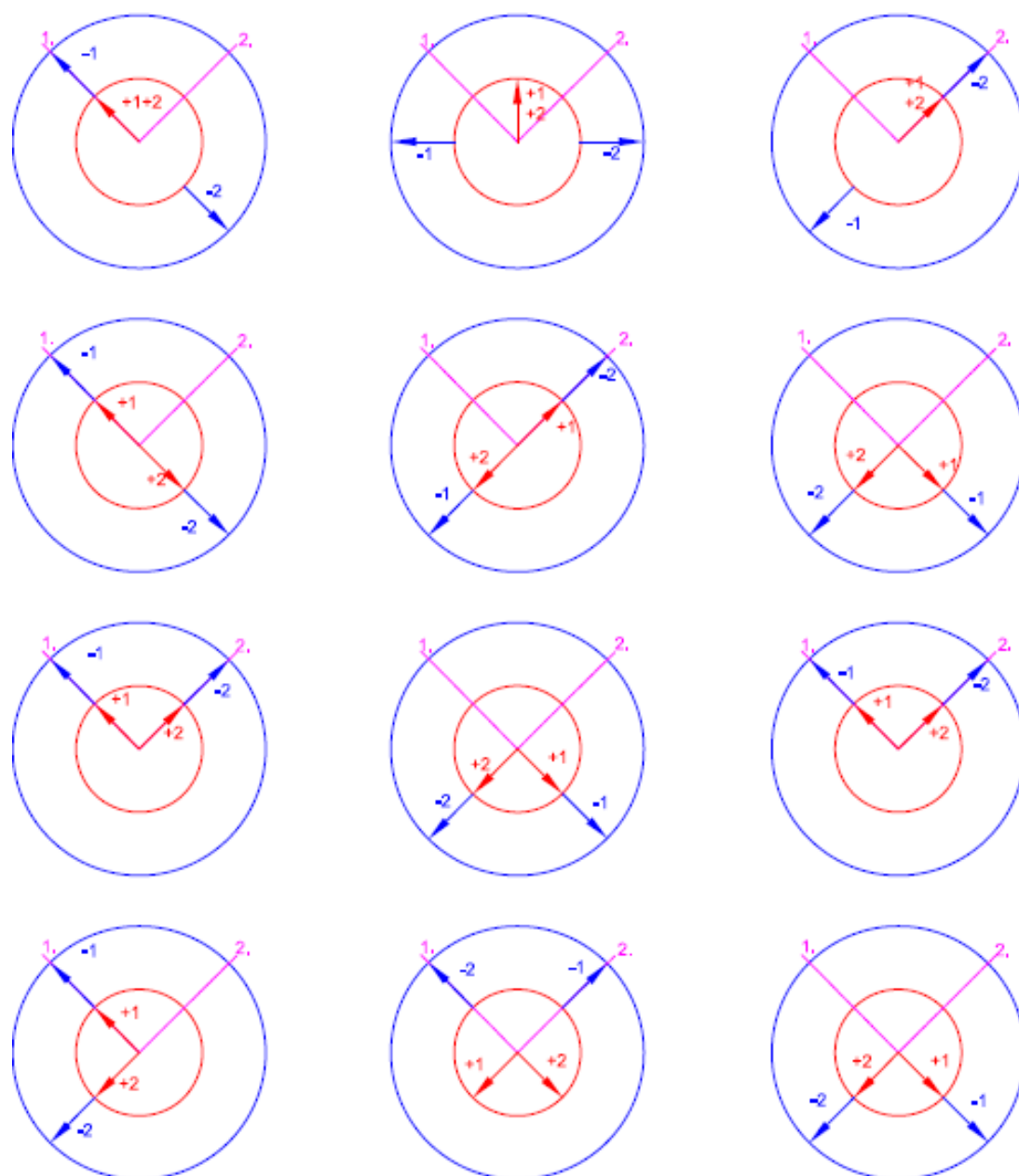
### 3.2 V-motori

Od V-motora analizirani su motori sa 2,4,6,8 i 12 cilindara.

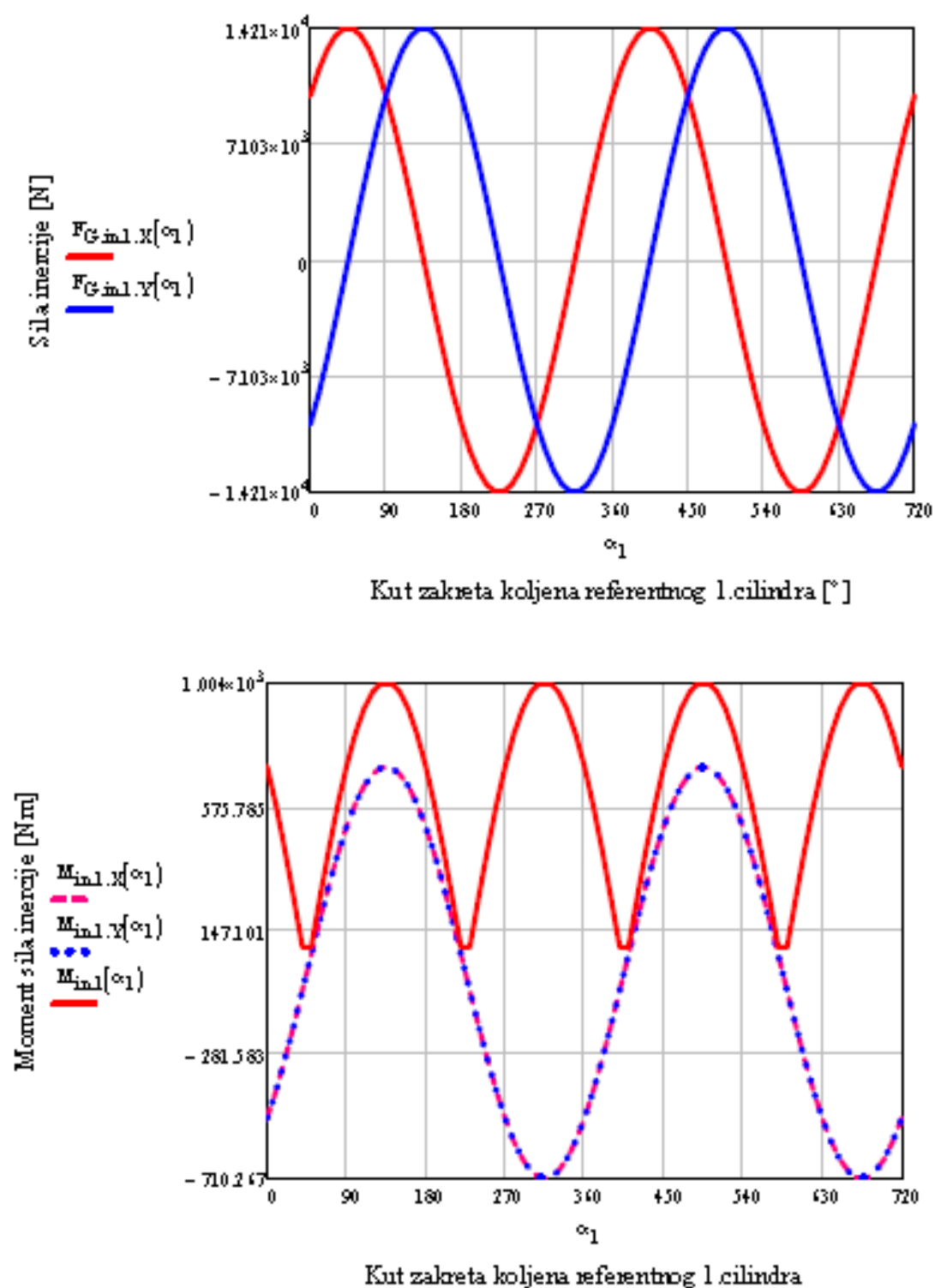
#### 3.2.1 V-2 motor

V-2 motori svoju najrašireniju primjenu našli su kod motocikala.


**Slika 37** Primjeri ugradnje V-2 motora u Harley Davidson i Moto Guzzi








**Slika 38** Rotirajući vektori sila inercije po redovima

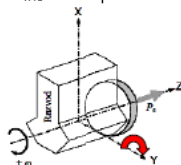


Slika 39 Dijagrami sila i momenta inercije 1.reda

**Tabela 8 Usporedba rezultata za V-2 motor**

Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	$F_{in1}$	$F_{in1}$	0	0	$F_{in1}$	$F_{in1}$	$F_{in1}$
	$M_{in1}$	$F_{in1}\Delta$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	0	0	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$
2.red	$F_{in2}$	$\sqrt{2}F_{in2}$	$\sqrt{2}F_{in2}$	0	0	$\sqrt{2}F_{in2}$	$\sqrt{2}F_{in2}$	$\sqrt{2}F_{in2}$
	$M_{in2}$	$F_{in2}\Delta$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$	$\sqrt{3}F_{in2}L$
4.red	$F_{in4}$	$\sqrt{2}F_{in4}$	$\sqrt{2}F_{in4}$	0	0	$\sqrt{2}F_{in4}$	$\sqrt{2}F_{in4}$	$\sqrt{2}F_{in4}$
	$M_{in4}$	$1/2\sqrt{2}F_{in4}\Delta$	$1/2\sqrt{2}F_{in4}L$	0	0	$1/2\sqrt{2}F_{in4}L$	0	0
6.red	$F_{in6}$	$\sqrt{2}F_{in6}$	$\sqrt{2}F_{in6}$	0	0	$\sqrt{2}F_{in6}$	$\sqrt{2}F_{in6}$	$\sqrt{2}F_{in6}$
	$M_{in6}$	$1/2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$	$1/2\sqrt{2}F_{in6}L$	0	0	$1/2\sqrt{2}F_{in6}L$	0	0

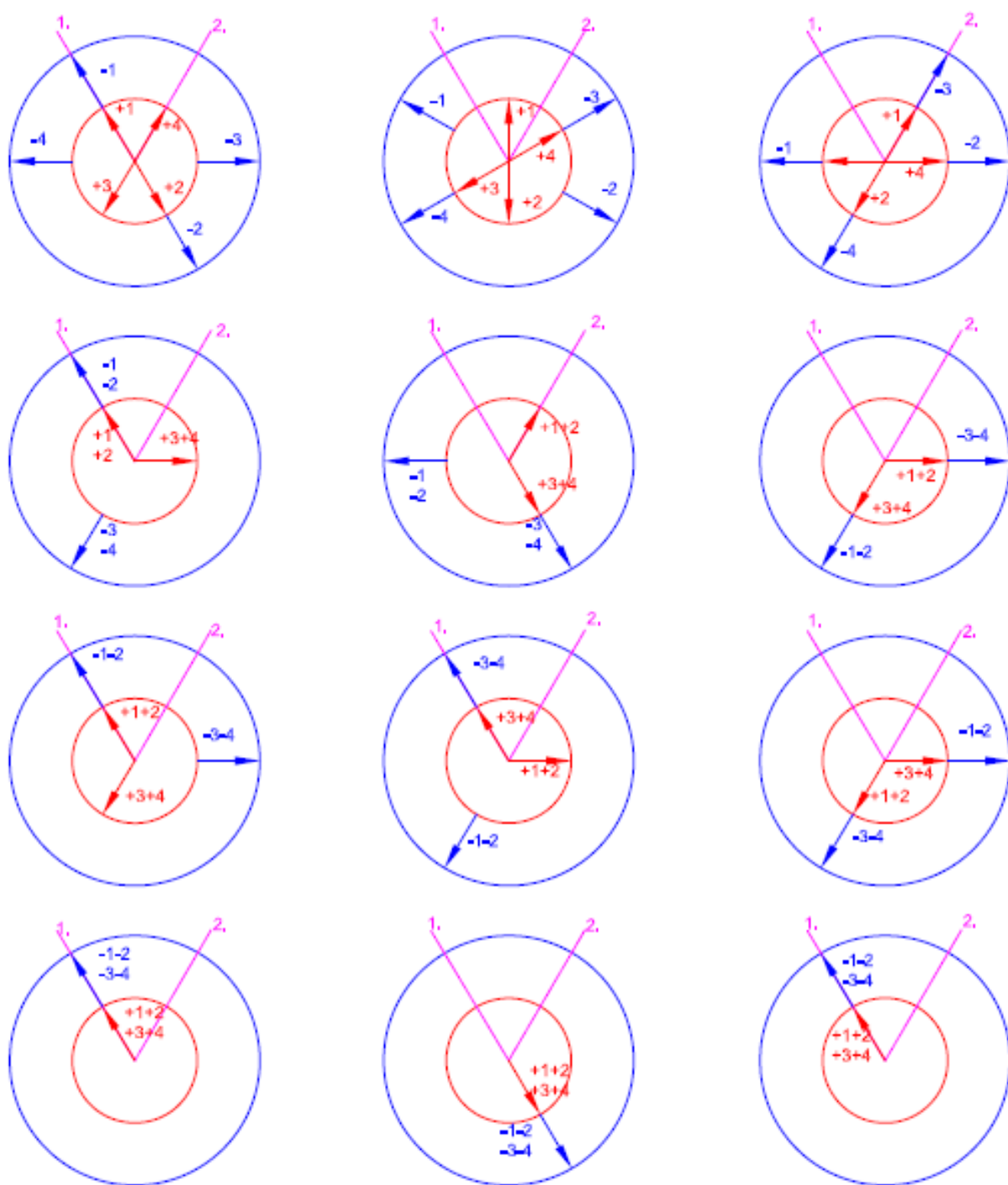
	Slobodna sila
	Slobodni moment
	Oscilira
	Oscilira i mijenja amplitudu
	Rotira pozitivno ili negativno



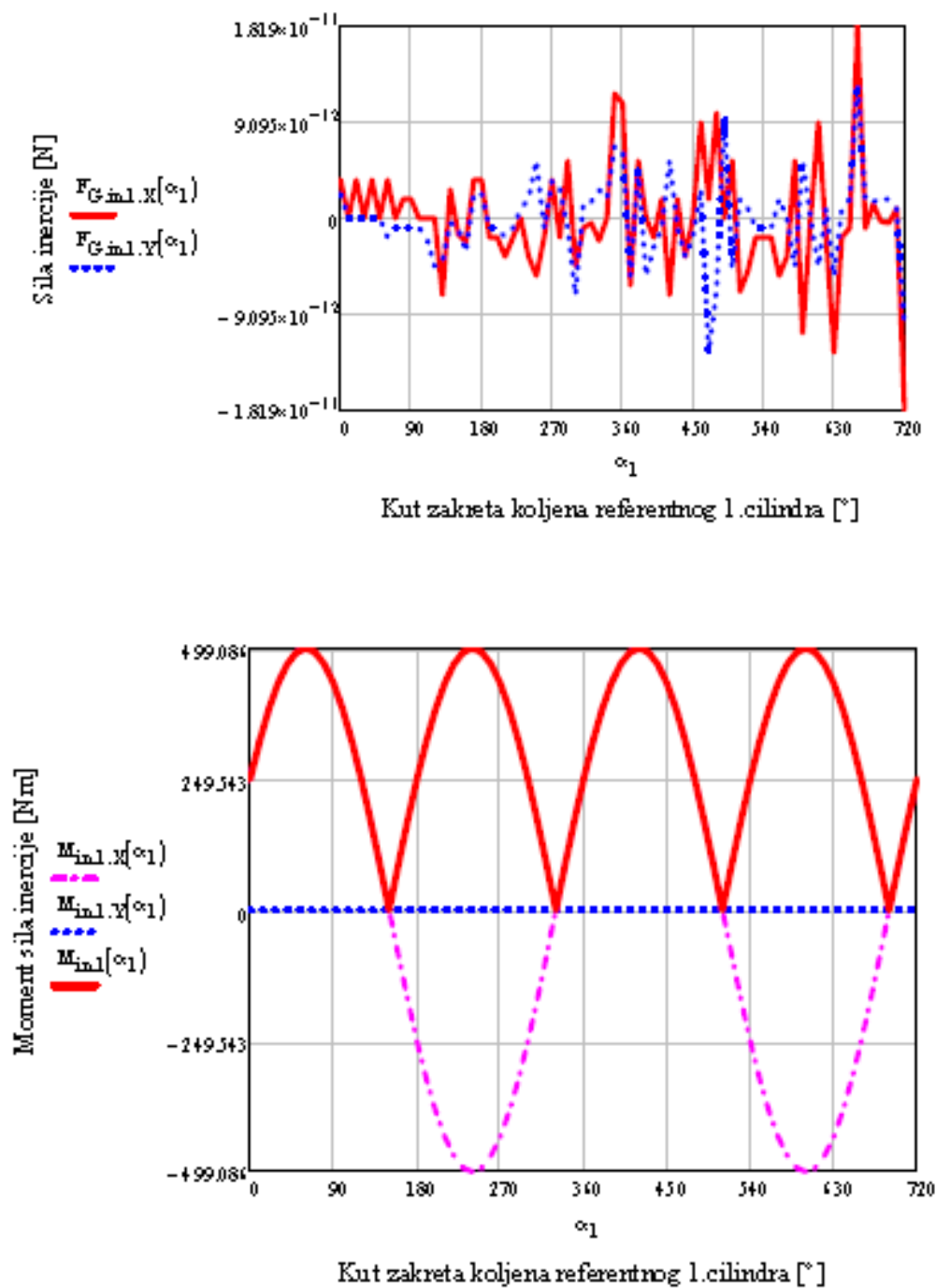
### 3.2.2 V-4 motor

Analiziran je V-4 motor sa kutom između cilindara  $60^\circ$ , najčešće je ugrađivan u Ford Taunus.


**Slika 40** Primjer Forda Taunusa








**Slika 41** Rotirajući vektori sila inercije po redovima sila inercije

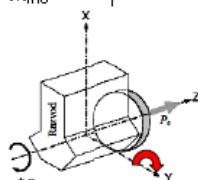


**Slika 42** Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda

**Tabela 9 Usporedba rezultata za V4-60° motor**

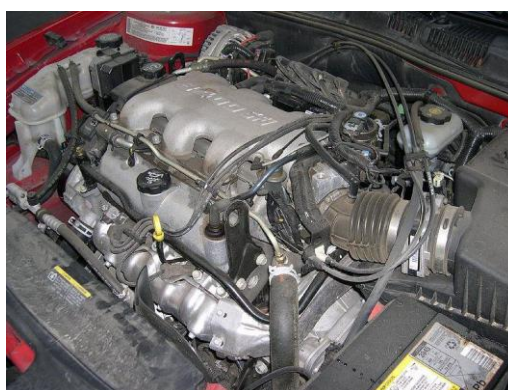
Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	$F_{in1}L \rightleftarrows$	$F_{in1}L \rightleftarrows$	$F_{in1}L \rightleftarrows$	0	$F_{in1}L$	$F_{in1}L$	$F_{in1}L$
2.red	$F_{in2}$	$2\sqrt{3}F_{in2} \updownarrow$	$2\sqrt{3}F_{in2} \updownarrow$	$2\sqrt{3}F_{in2} \updownarrow$	0	$2\sqrt{3}F_{in2}$	$2\sqrt{3}F_{in2}$	$2\sqrt{3}F_{in2}$
	$M_{in2}$	$F_{in2}\Delta \updownarrow$	$F_{in2}\Delta \updownarrow$	$F_{in2}\Delta \updownarrow$	0	$F_{in2}\Delta$	$F_{in2}\Delta$	$F_{in2}\Delta$
4.red	$F_{in4}$	$2\sqrt{3}F_{in6} \updownarrow$	$2\sqrt{3}F_{in6} \updownarrow$	$2\sqrt{3}F_{in6} \updownarrow$	0	$2\sqrt{3}F_{in6}$	$2\sqrt{3}F_{in6}$	$2\sqrt{3}F_{in6}$
	$M_{in4}$	$F_{in2}\Delta \updownarrow$	$F_{in2}\Delta \updownarrow$	$F_{in2}\Delta \updownarrow$	0	$F_{in2}\Delta$	$F_{in2}\Delta$	$F_{in2}\Delta$
6.red	$F_{in6}$	$2\sqrt{3}F_{in6} \updownarrow$	$2\sqrt{3}F_{in6} \updownarrow$	0	0	$2\sqrt{3}F_{in6}$	$\sqrt{3}F_{in6}$	$2\sqrt{3}F_{in6}$
	$M_{in6}$	$F_{in6}\Delta \updownarrow$	$F_{in6}\Delta \updownarrow$	$F_{in6}\Delta \rightleftarrows$	0	$F_{in6}\Delta$	$F_{in6}\Delta$	$F_{in6}\Delta$

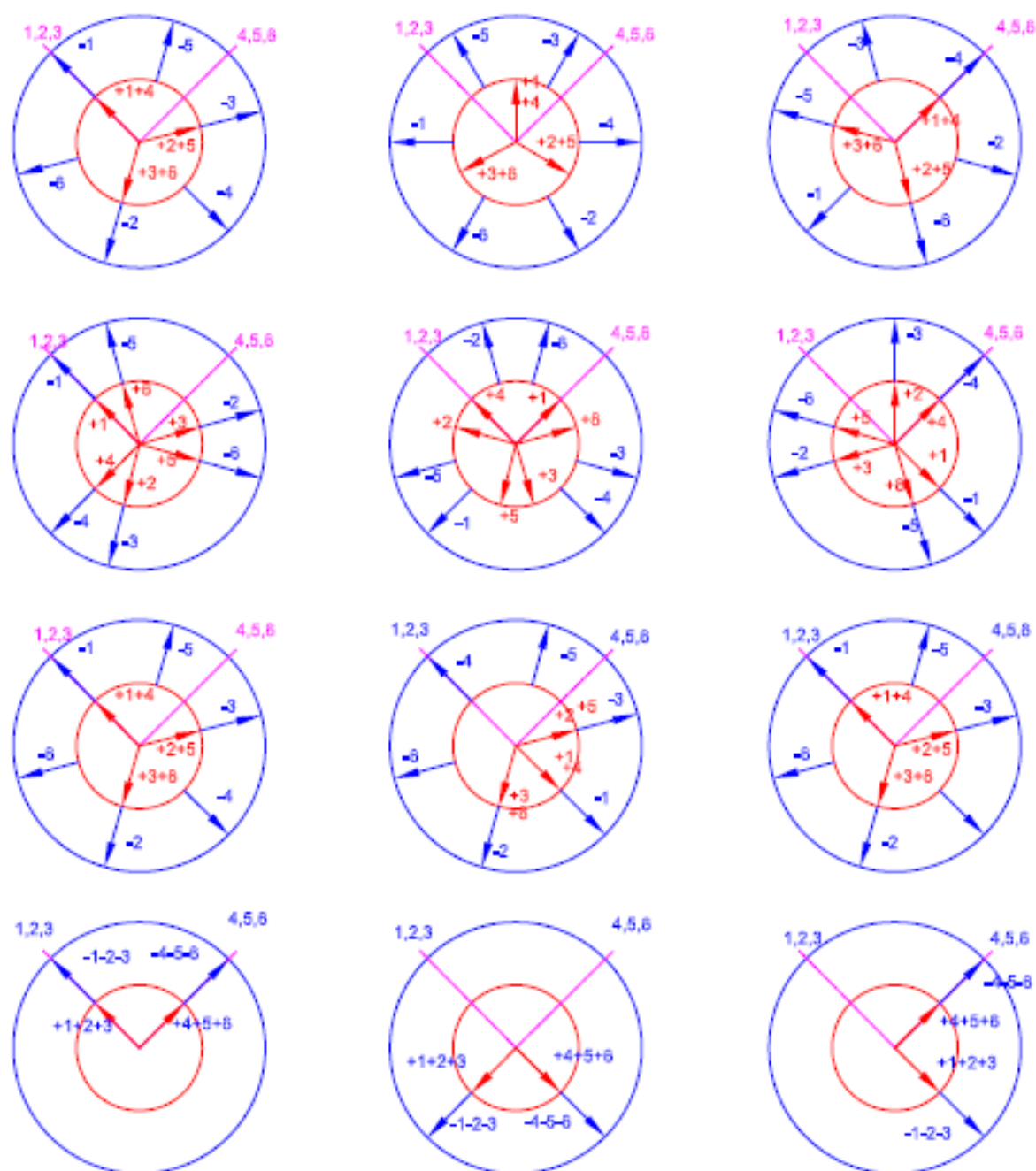
	Slobodna sila
	Slobodni moment
	Oscilira
	Oscilira i mijenja amplitudu
	Rotira pozitivno ili negativno



### 3.2.3 V6-60° split pin koljenasto vratilo

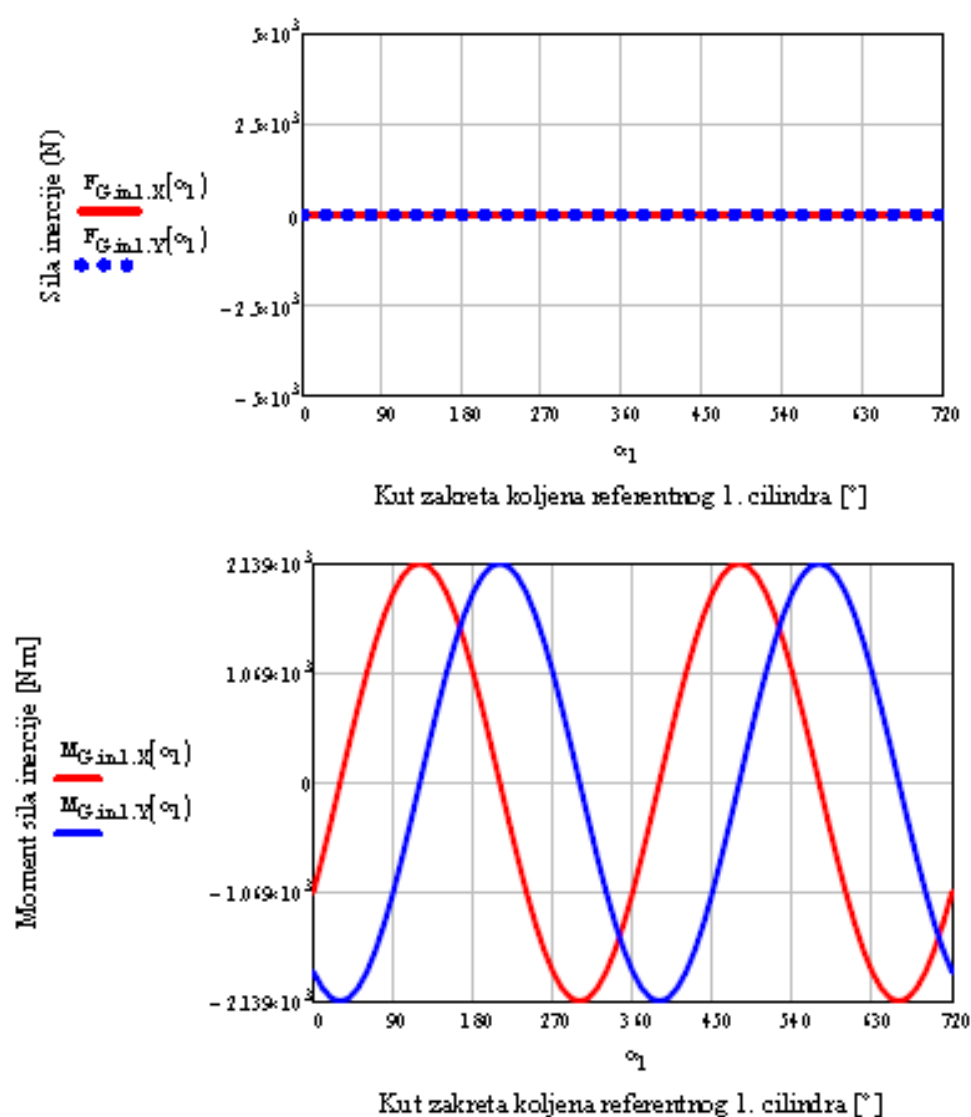
6-cilindarski V-motor ima jednake razmake paljnja, to je iz razloga što su koljena u istom V-elemntu pod kutem, takvu izvedbu nazivamo split pin koljenastim vratilom.


**Slika 43 GM V-6 60°**














**Slika 44** Rotirajući vektori sila inercije po redovima








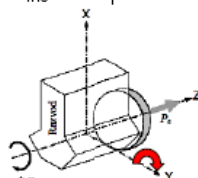


**Slika 45** Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda

**Tabela 10 Usporedba rezultata za V-6 60°**

Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	$3/2 F_{in1} \Delta$ 	$3/2 F_{in1} \Delta$ 	$3/2 F_{in1} \Delta$ 	0	$3/2 F_{in1} \Delta$	$3/2 F_{in1} \Delta$	$3/2 F_{in1} \Delta$
2.red	$F_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	$3/2 F_{in2} \Delta$ 	$3/2 F_{in2} \Delta$ 	$3/2 F_{in2} \Delta$ 	$3/2 F_{in2} \Delta$	$3/2 F_{in2} \Delta$	$3/2 F_{in2} \Delta$	$3/2 F_{in2} \Delta$
4.red	$F_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in4}$	$1/2 \sqrt{2} F_{in4} \Delta$ 	$1/2 \sqrt{2} F_{in4} \Delta$ 	0 	0	$1/2 \sqrt{2} F_{in4} \Delta$	$1/2 \sqrt{2} F_{in4} \Delta$	$1/2 \sqrt{2} F_{in4} \Delta$
6.red	$F_{in6}$	$3 \sqrt{3} F_{in6}$ 	$3 \sqrt{3} F_{in6}$ 	0	0	$3 \sqrt{3} F_{in6}$	$3 \sqrt{3} F_{in6}$	$\sqrt{3} \sqrt{3} F_{in6}$
	$M_{in6}$	$3/2 F_{in6} \Delta$	$3/2 F_{in6} \Delta$	0	0	$3 \sqrt{3} F_{in6}$	0	0

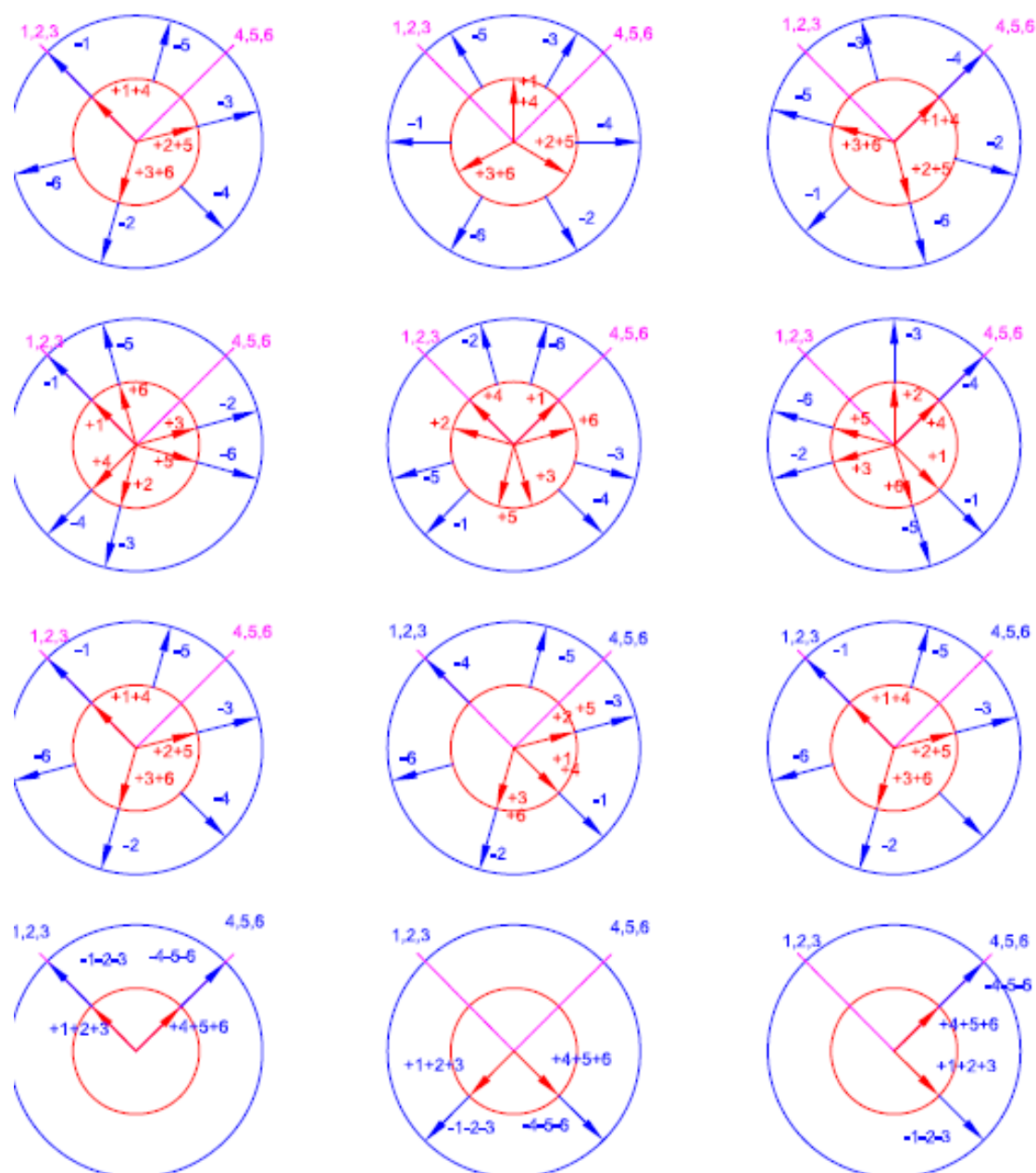
	Slobodna sila
	Slobodni moment
	Oscilira
	Oscilira i mijenja amplitudu
	Rotira pozitivno ili negativno



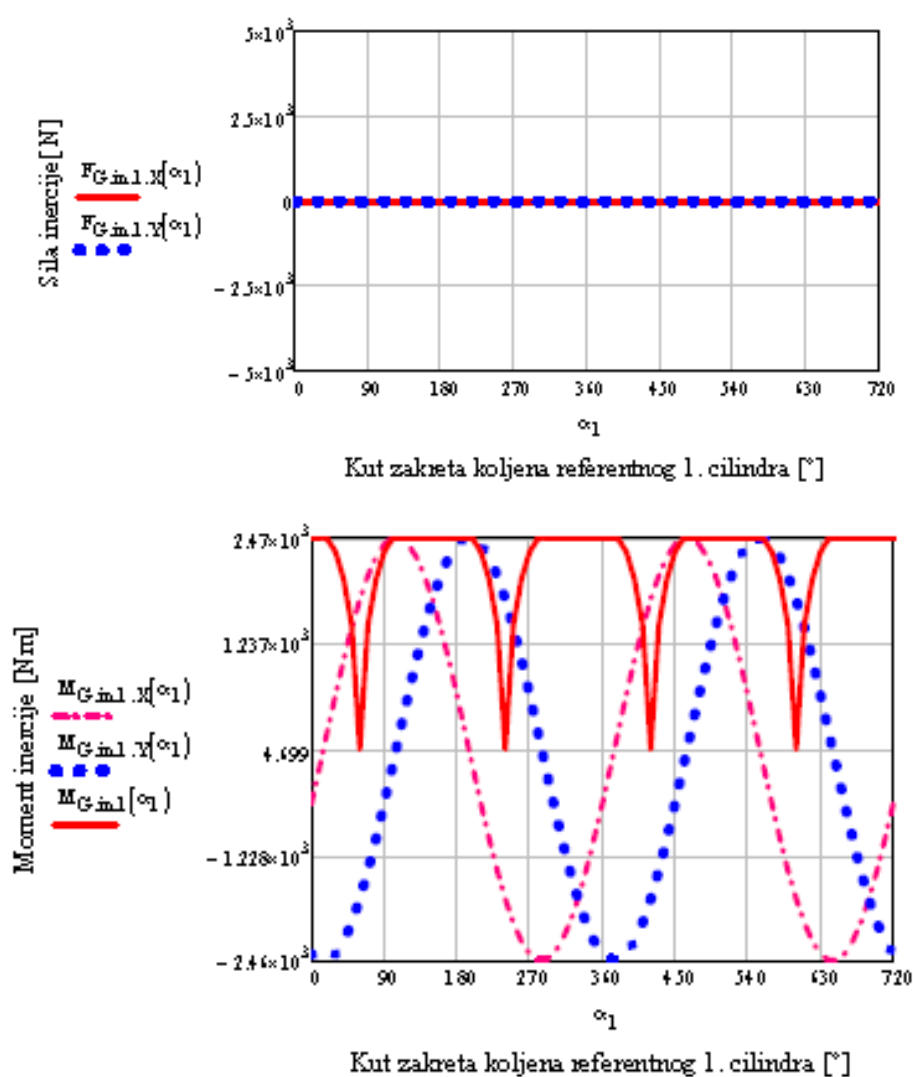
### 3.2.4 V-6 90° - koljenasto vratilo sa 3 koljena

V-6 motor sa kutom između cilindara od 90° ima po dvije klipnjače na svakom koljenu, a zbog toga i nejednolike razmake paljenja. Ovakva izvedba nalazi se kod General Motors Buic 90°. Motor je nastao od V-8 i to tako da mu je uklonjen jedan par cilindara.


**Slika 46 V-6 GM Buick**



**Slika 47** Rotirajući vektori sila inercije od 1.do 6.reda

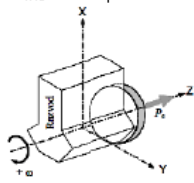


**Slika 48** Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda

**Tabela 11 Usporedba rezultata za V-60 90°**

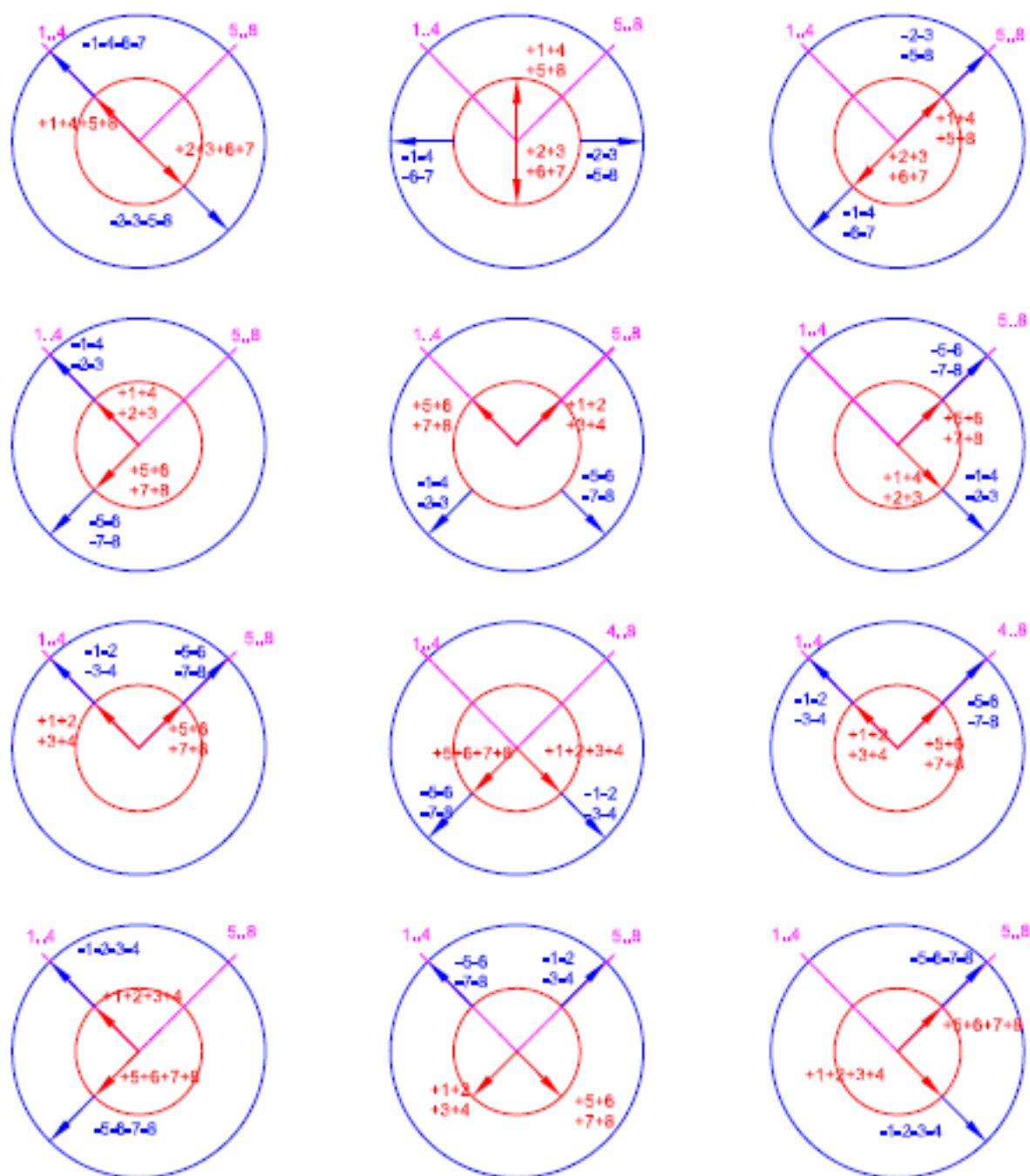
Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	0	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$	$\sqrt{3}F_{in1}L$
2.red	$F_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	$\sqrt{6}F_{in2}L$	$\sqrt{6}F_{in2}L$	$\sqrt{6}F_{in2}L$	0	$\sqrt{6}F_{in2}L$	$\sqrt{6}F_{in2}L$	$\sqrt{6}F_{in2}L$
4.red	$F_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in4}$	$\sqrt{6}F_{in4}L$	$\sqrt{6}F_{in4}L$	$\sqrt{6}F_{in4}L$	0	$\sqrt{6}F_{in4}L$	$\sqrt{6}F_{in4}L$	$\sqrt{6}F_{in4}L$
6.red	$F_{in6}$	$3\sqrt{2}F_{in6}$	$3\sqrt{2}F_{in6}$	$3\sqrt{2}F_{in6}$	0	$3\sqrt{2}F_{in6}$	$3\sqrt{2}F_{in6}$	$3\sqrt{2}F_{in6}$
	$M_{in6}$	$3/2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$	$3/2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$	$3/2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$	0	$3/2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$	$3/2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$	$3/2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$

	Slobodna sila
	Slobodni moment
	Oscilira
	Oscilira i mijenja amplitudu
	Rotira pozitivno ili negativno



### 3.2.5 V-8 motor – koljena u jednoj ravlini

Ovo je trkaća izvedba motora koji ima smještena koljena u jednu ravninu, kao kod 4-cilindarskog rednog motora.

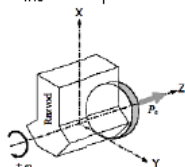


**Slika 49** Rotirajući vektori sila inercije

**Tabela 12** Usporedba rezultata

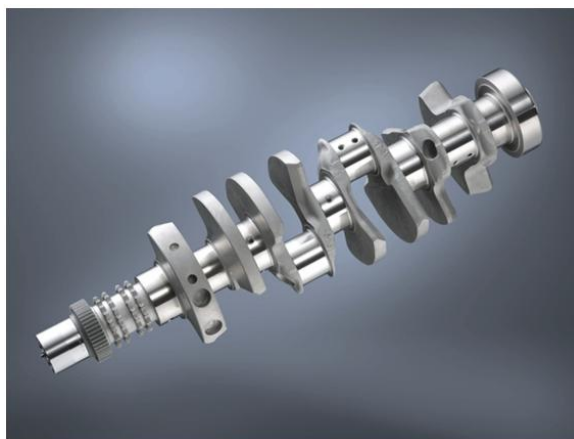
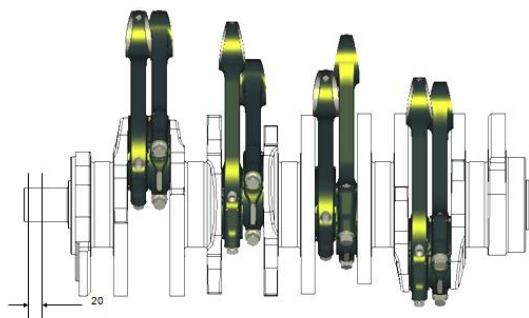
Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
2.red	$F_{in2}$	$4\sqrt{2}F_{in2}$ ↔	$4\sqrt{2}F_{in2}$ ↔	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	$2\sqrt{2}F_{in2}\Delta$ ↔	$2\sqrt{2}F_{in2}\Delta$ ↔	$4F_{in2}\Delta$ ↑↓	0	0	0	0
4.red	$F_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in4}$	$2\sqrt{2}F_{in4}\Delta$ ↔	$2\sqrt{2}F_{in4}\Delta$ ↔	0	0	0	0	0
6.red	$F_{in6}$	$4\sqrt{2}F_{in6}$ ↔	$4\sqrt{2}F_{in6}$ ↔	0	0	0	0	0
	$M_{in6}$	$2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$ ↔	$2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$ ↔	$4F_{in6}\Delta$ ↑↓	0	0	0	0

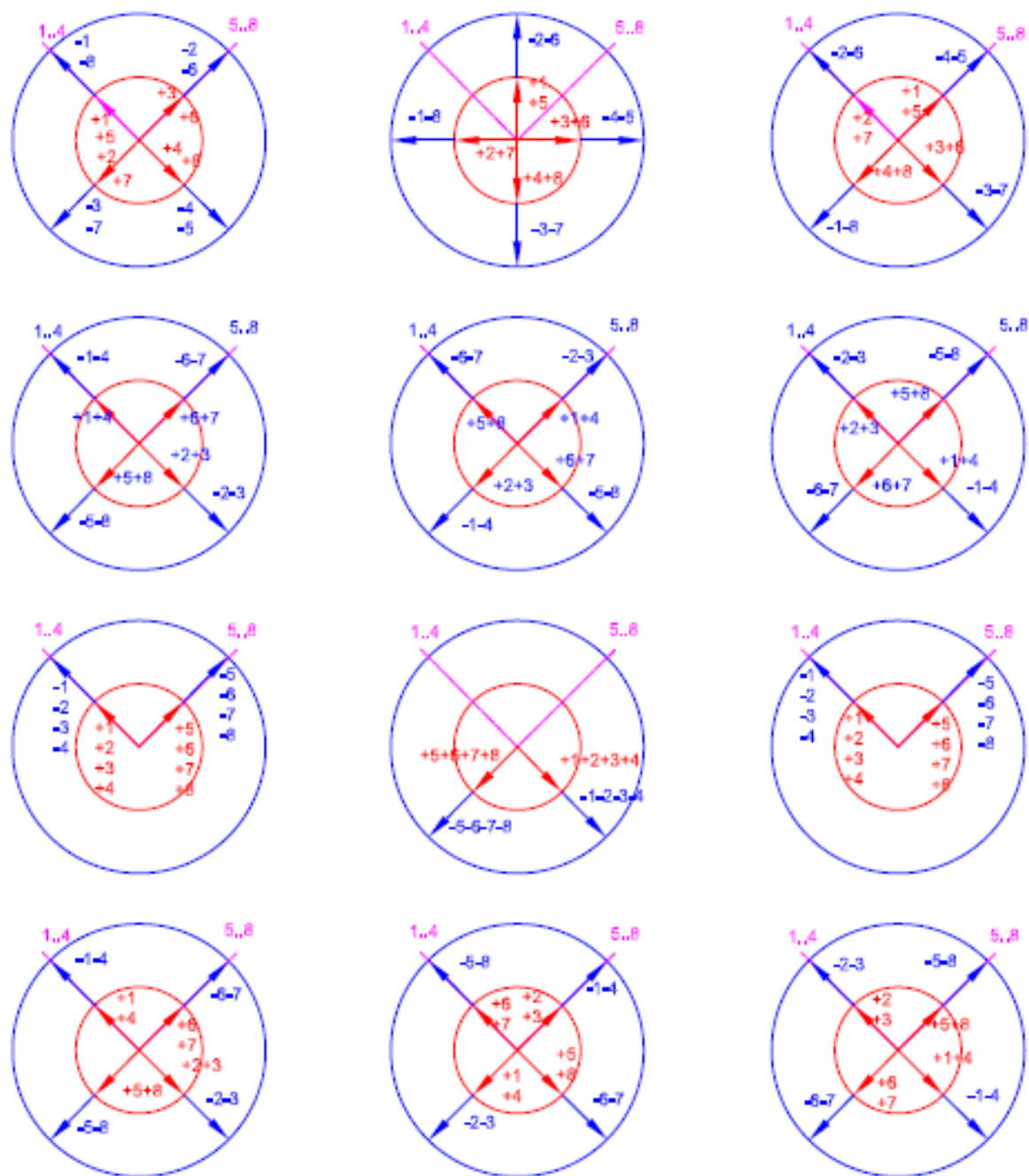
↑	Slobodna sila
↺	Slobodni moment
↕	Oscilira
↔	Oscilira i mijenja amplitudu
↻	Rotira pozitivno ili negativno



### 3.2.6 V-8 motor 90°

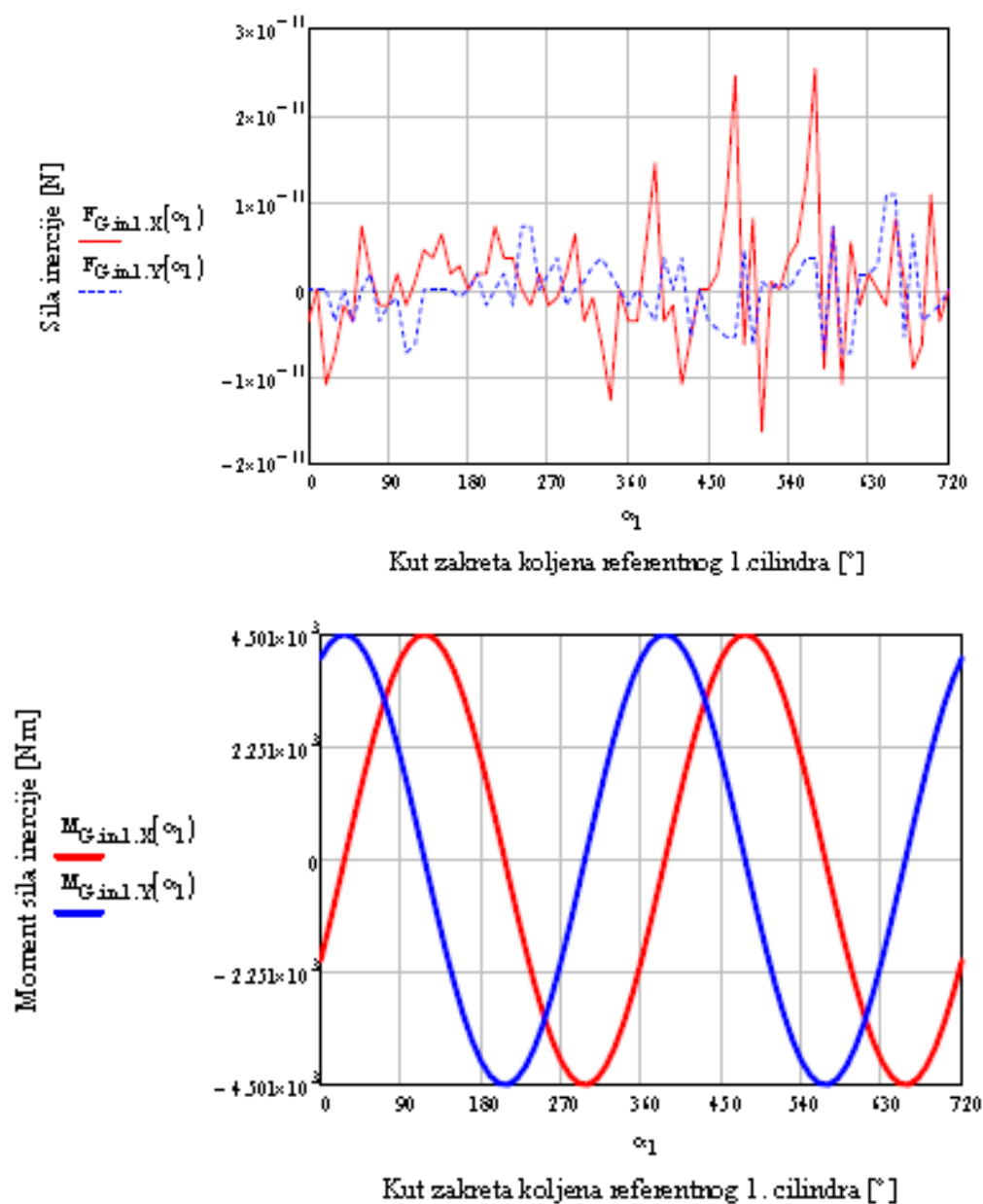
Ova izvedba motora ima cross-plane koljenasto vratilo.


**Slika 50** Primjer cross-plane koljenastog vratila V-8 motora












**Slika 51** Rotirajući vektori sila inercije po redovima








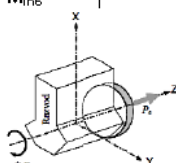


**Slika 52** Dijagrami sila i momenata inercije 1.reda

Tabela 13 Usporedba rezultata

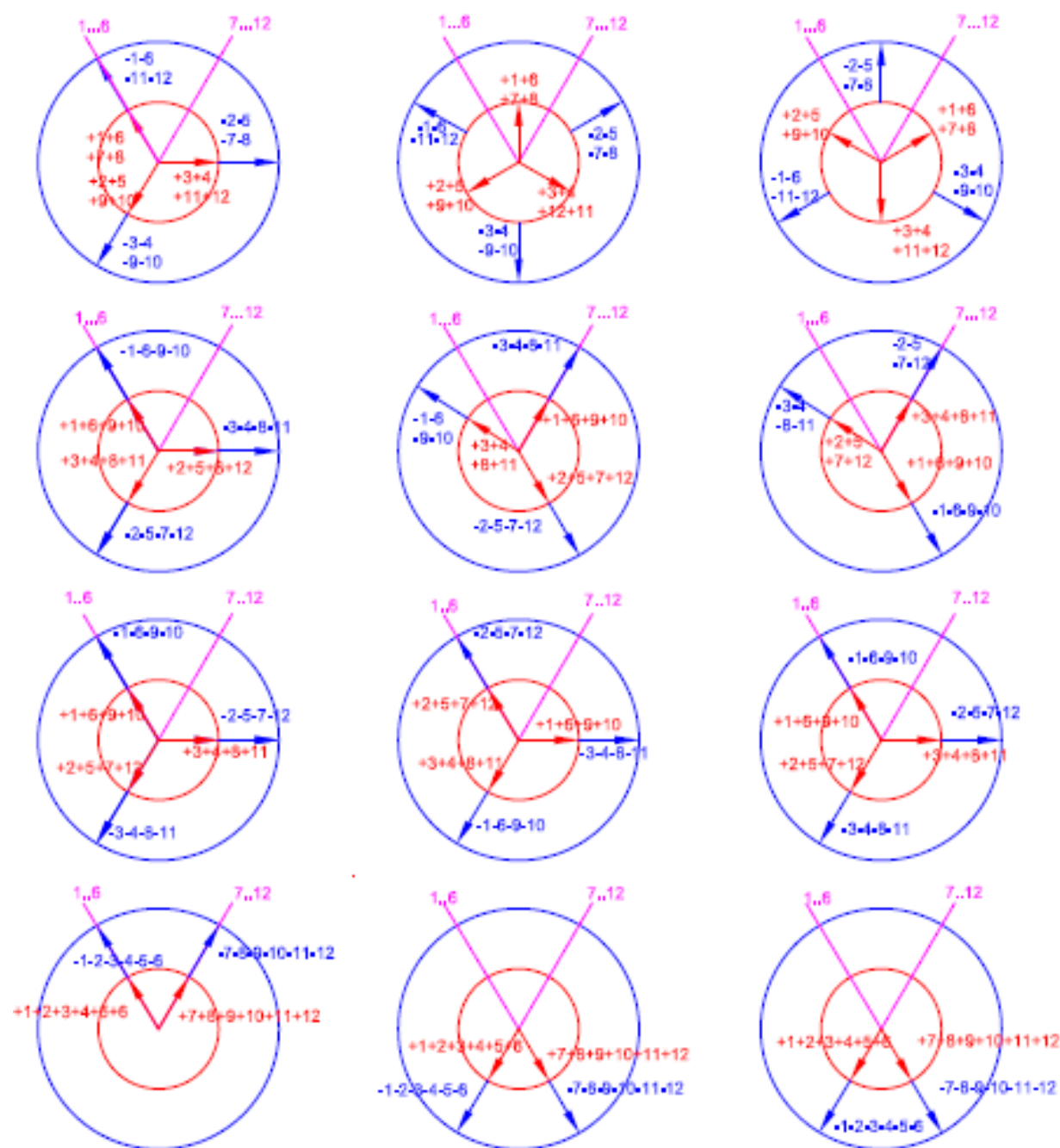
Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	$\sqrt{10}F_{in1}$ 	$\sqrt{10}F_{in1}$ 	$\sqrt{10}F_{in1}$ 	0	0	0	0
2.red	$F_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	0	0	0	0	0	0	0
4.red	$F_{in4}$	$2\sqrt{2}F_{in4}$ 	$2\sqrt{2}F_{in4}$ 	$2\sqrt{2}F_{in4}$ 	0	0	0	0
	$M_{in4}$	$4\sqrt{2}F_{in4}\Delta$ 	$4\sqrt{2}F_{in4}\Delta$ 	$4\sqrt{2}F_{in4}\Delta$ 	0	0	0	0
6.red	$F_{in6}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in6}$	0	0	0	0	0	0	0

	Slobodna sila
	Slobodni moment
	Oscilira
	Oscilira i mijerisa amplitudu
	Rotira pozitivno ili negativno



### 3.2.7 V-12 motor 60°

Izvedba V-12 motora glede sila inercije i njihovih momenata potpuno je uravnotežena. Neuravnoteženost se javlja tek u šestom redu, gdje su momenti sila uravnoteženi.

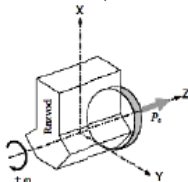


**Slika 53** Rotirajući vektori sila inercije

Tabela 14 Usporedba rezultata

Sile inercije Momenti sila inercije		Grafička analiza Metoda rotirajućih vektora	Analitička analiza Mathcad	Rezultati iz literature				
				Lang	Bosch	Dubbel	Maass	Küntsc her
				[3]	[4]	[5]	[6]	[7]
1.red	$F_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in1}$	0	0	0	0	0	0	0
2.red	$F_{in2}$	$4\sqrt{2}F_{in2}$ ↔	0	0	0	0	0	0
	$M_{in2}$	$2\sqrt{2}F_{in2}\Delta$ ↔	0	0	0	0	0	0
4.red	$F_{in4}$	0	0	0	0	0	0	0
	$M_{in4}$	$2\sqrt{2}F_{in4}\Delta$ ↔	0	0	0	0	0	0
6.red	$F_{in6}$	$4\sqrt{2}F_{in6}$ ↔	$6\sqrt{3}F_{in6}$ ↑↓	$6\sqrt{3}F_{in6}$ ↑↓	0	0	0	0
	$M_{in6}$	$2\sqrt{2}F_{in6}\Delta$ ↔	$3F_{in6}\Delta$ ↑↓	$3F_{in6}\Delta$ ↑↓	0	0	0	0

↑	Slobodna sila
↺	Slobodni moment
↕	Oscilira
↔	Oscilira i mijenja amplitudu
↻	Rotira pozitivno ili negativno



## 4 ZAKLJUČAK

Svi zadaci su riješeni na dva načina te se podudaraju sa rezultatima iz literature. Teško je ustvrditi koji je motor najbolji, ako promatramo uravnoteženost onda su to motori sa većim brojem cilindara i jednolikom redoslijedom paljenja, no međutim zbog dimenzija prilikom ugradnje poprilično se koriste i motori koji imaju problema sa neuravnoteženošću no to se rješava ugradnjom balansirajućih osovina i protutezima.

U ovom radu pažnja je posvećena rednim i V-motorima koji su najdugovječniji u automobilske industriji.

## **5 PRILOG**

Rješenja zadataka u Mathcadu

CD-R

## **Popis literature**

- [1] Mahalec, Lulić, Kozarac: Konstrukcije motora
- [2] Mahalec, Lulić, Kozarac: Motori s unutrašnjim izgaranjem
- [3] Lang, Triebwerke schnellaufeder Verbrennungsmotoren
- [4] Bosch, Kraftfahr-technisches tachenbuch
- [5] Grote und Feldhusen: Dubbel Taschenbuch fur den Maschinenbau
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/Straight-two\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Straight-two_engine)
- [7] [http://www.autozine.org/technical\\_school/engine/smooth1.htm#Inline-2](http://www.autozine.org/technical_school/engine/smooth1.htm#Inline-2)
- [8] [http://en.wikipedia.org/wiki/Straight-five\\_engine](http://en.wikipedia.org/wiki/Straight-five_engine)